

Praxisnahes Verfahren zur Beurteilung der Dichtigkeit oberflächennaher Betonschichten im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit

Forschungsbericht

Dipl.-Phys. K. Paulmann
Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Oktober 1990

Diese Arbeit wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert:

Az.: Ro 288/24 - 1
Antrag vom 14.10.1986
Kennwort: Gefügedichtigkeit

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Kurzfassung

Die Permeabilität der oberflächennahen Betonschicht wird allgemein als ein wichtiges Kriterium für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen (Schutz vor Bewehrungskorrosion) angesehen. Zur Vor-Ort-Beurteilung bestehender Gebäude wurde daher ein einfaches, baustellengeeignetes Verfahren zur Messung der Gaspermeabilität entwickelt, das gegenüber den bisher bekannten derartigen Verfahren einige Vorzüge aufweist. Damit wurden Messungen an bewitterten Versuchswänden und Bauteiloberflächen durchgeführt.

Die Permeabilität bewitterter Betonoberflächen zeigte nur geringe jahreszeitliche Schwankungen und praktisch keine Abhängigkeit vom kurzzeitigen Witterungsverlauf. Der Feuchtegehalt des Betons, dessen starker Einfluß auf die Permeabilität bekannt ist und bestätigt wurde, ändert sich witterungsbedingt offenbar nur in einer sehr dünnen Oberflächenschicht.

Ältere Gebäude ohne und mit Schäden durch Bewehrungskorrosion unterschieden sich im mittleren Permeabilitätskoeffizienten um den Faktor 5. Ein Zusammenhang zwischen Permeabilitätskoeffizient und Karbonatisierungstiefe wurde nachgewiesen. Nach bisherigen Ergebnissen sind bei üblichen Betondeckungen Betone mit $K \gtrsim 10^{-16} \text{ m}^2$ als nicht mehr dauerhaft zu beurteilen.

Abstract

The permeability of the surface layer is commonly regarded as an important criterium for the durability (protection against corrosion of reinforcement) of concrete structural members. Thus, for estimation of buildings a simple method for on-site measurements of gas permeability was developed which has some advantages in comparison with similar methods published until now. With this method, test walls and buildings exposed to weather have been investigated.

Permeability of exposed surfaces showed a limited extent of seasonal variation and nearly no dependance on short-term climate. The moisture content of concrete, whose strong influence on permeability is known and was proved here, obviously varies only within a thin surface layer.

Older buildings without and with damage by corrosion of reinforcement differed in the mean coefficient of permeability by a factor of 5. Correlation was found between permeability and depth of carbonation. Experiments indicate that, for a concrete cover of usual thickness, permeabilities of $K \gtrsim 10^{-16} \text{ m}^2$ result in loss of durability.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	4
2. Physikalische Grundlagen	5
3. Literaturlauswertung: Dichtigkeitstprüfung an Bauwerksbeton	7
3.1 Oberflächen-Meßverfahren	8
3.2 Deckschicht-Meßverfahren	9
3.3 Beurteilung	11
4. Meßverfahren	14
4.1 Zielsetzung	14
4.2 Beschreibung des Verfahrens	15
4.3 Geometrieparameter	18
4.3.1 Durchmesser der Gaseinlaßbohrung	18
4.3.2 Innendurchmesser des Gassammlers	18
4.3.3 Außendurchmesser des Gassammlers	19
4.3.4 Tiefe der Einlaßbohrung	19
4.3.5 Durchströmte Schichtdicke	20
4.4 Einfluß des Eingangsdruckes	20
4.5 Permeabilitätsmaß	21
4.6 Kalibrierung zur Messung des Permeabilitätskoeffizienten	22
4.7 Meßbereich, Meßgenauigkeit	24
5. Messungen nach dem "Bauwerksverfahren"	25
5.1 Untersuchungsobjekte	25
5.2 Werkstoffbedingte Streuungen	26
5.3 Feuchteabhängigkeit der Permeabilität	28
5.4 Klimaeinfluß bei Messungen an freibewitterten Bauteilen	29
5.5 Messungen an älteren Gebäuden	32
6. Begleitende Untersuchungen	34
6.1 Zusammenhang zwischen Permeabilität und Karbonatisierungstiefe	34
6.2 Korrelation zwischen Permeabilitätskoeffizient und Wasseraufnahme nach British Standard 1881 (ISAT-Verfahren)	35
6.3 Quecksilber-Porosimetrie	35
6.4 Transportwege des Gases im Beton	36
6.5 Früherkennung von Korrosionstreibrissen	37
7. Zusammenfassung	39
Literatur	41

1. Einleitung

Entscheidend für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton gegenüber Witterungseinflüssen ist die Dichtigkeit der oberflächennahen Schicht - Betondeckung der Bewehrung von höchstens 5 cm Dicke - gegenüber Stoffen, die den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen, also Wasser, O_2 , CO_2 , SO_2 und Cl-Ionen.

Als Mechanismen für den Stofftransport im Porenraum des Betons kommen im wesentlichen

- Diffusion (Transport von Flüssigkeiten oder Gasen aufgrund eines Partialdruckgefälles),
- Permeation (Transport von Flüssigkeiten oder Gasen aufgrund eines Absolutdruckgefälles) und
- Kapillarleitung (Transport von Flüssigkeiten aufgrund ihrer Oberflächenspannung)

in Betracht.

Die unterschiedliche Abhängigkeit der zugehörigen Transportkoeffizienten - Diffusions-, Permeabilitäts- und Wasseraufnahmekoeffizient - vom Porenradius ist bekannt, z.B. /1 - 5/, und läßt bei Beton, dessen Porensystem durch eine über mehrere Zehnerpotenzen sich erstreckende Radienverteilung gekennzeichnet ist, eine einfache Umrechenbarkeit nicht erwarten; trotzdem zeigen zahlreiche Untersuchungen, z.B. /6 - 14/, einen gleichartigen Einfluß betontechnologischer Parameter wie w/z-Wert, Verdichtung und Nachbehandlung auf alle Transportkoeffizienten.

Da Diffusionsmessungen den vergleichsweise höchsten apparativen und zeitlichen Aufwand erfordern, kommt der Messung der Permeabilität - neben der Kapillarleitung - besondere Bedeutung bei der Beurteilung der Dichtigkeit oberflächennaher Betonschichten zu.

Die Bestimmung des Permeabilitätskoeffizienten von Beton im Labor, zweckmäßigerweise an scheibenförmigen Proben mit eindimensionaler, räumlich homogener Durchströmung, ist seit Jahren Stand der Technik; entsprechende

Apparaturen werden auch kommerziell angeboten. Für die Untersuchung des Einflusses betontechnologischer Parameter auf die Dichtigkeit steht damit ein geeignetes Instrument zur Verfügung.

Die Beurteilung der Dichtigkeit von Beton am Bauwerk - mit dem Ziel einer Dauerhaftigkeitsprognose - setzt möglichst einfache, zerstörungsarm arbeitende Verfahren mit transportablen Apparaturen voraus. In der Literatur, s.u., finden sich zahlreiche Anordnungen unterschiedlicher Geometrie; ein wesentlicher Unterschied zur Permeabilitätsmessung an scheibenförmigen Probekörpern besteht darin, daß die Stromlinien i.a. gekrümmt sind, d.h. die Stromdichte ortsabhängig ist.

Keines dieser Verfahren konnte sich bisher allgemein durchsetzen, was u.E. auf jeweils unterschiedliche handhabungs- oder meßtechnische Schwierigkeiten zurückzuführen ist sowie darauf, daß Reproduzierbarkeit, Vertrauensbereich und damit auch Anwendungsgrenzen nicht bekannt sind oder nicht den praktischen Anforderungen genügen.

Es wurde daher der Versuch unternommen, mit einem neuen Verfahren diese erkannten Nachteile zu vermeiden und den Nachweis der möglichst uneingeschränkten Eignung für Messungen am Bau zu erbringen.

2. Physikalische Grundlagen

Die stationäre, eindimensionale, laminare Strömung von Wasser durch ein poröses Material wird im allgemeinen mit der Darcyschen Filtergleichung beschrieben:

$$Q = k \cdot \frac{A}{L} \cdot h$$

mit Q Volumenstrom [m³/s]

k Permeabilitätskoeffizient [m/s]

A Querschnittsfläche des Probekörpers [m²]

L Dicke des Probekörpers parallel zur Strömung [m]

h einwirkender Wasserdruck, gemessen als Höhe der Wassersäule [m]

Bei kleinen Durchlässigkeiten ist die Bestimmung des Permeabilitätskoeffizienten k aus dem stationären Durchfluß zeitaufwendig und ungenau. In diesen Fällen ist es sinnvoller, den instationären Wassereindringvorgang zu verfolgen. Für die zeitliche Zunahme der Wassereindringtiefe e [m] gilt unter Vernachlässigung von Kapillarkräften

$$\frac{de}{dt} = \frac{k}{e(t)} \cdot h,$$

daraus folgt durch Integration unter Beachtung der Anfangsbedingung

$$e(t) = \sqrt{2 k h t}$$

bzw. für die flächenbezogene aufgenommene Wassermenge W [m³/m²]

$$W(t) = u_v \cdot e(t) = u_v \cdot \sqrt{2 k h t},$$

wobei u_v der volumetrische Feuchtegehalt ist, der sich infolge der Druckwasserbeanspruchung in dem porösen Material einstellt. Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen e bzw. W und \sqrt{t} .

Bei Verallgemeinerung der Darcyschen Filtergleichung auf beliebige Flüssigkeiten sind deren unterschiedliche Viskositäten zu berücksichtigen, es gilt

$$Q = K \cdot \frac{A}{\eta L} \cdot (p_e - p_a)$$

mit K spezifischer Permeabilitätskoeffizient [m²]

η Viskosität des strömenden Mediums [Nsm⁻²]

p_e, p_a Eingangsdruck und Ausgangsdruck absolut [Nm⁻²,

Atmosphärendruck = 10⁵ Nm⁻² = 1 bar]

(Für den Spezialfall der laminaren Strömung durch ein kreiszylindrisches Rohr mit Radius R und Länge L ist obige Gleichung als Hagen-Poiseuillesches Gesetz bekannt:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \eta L} \cdot (p_e - p_a)$$

Ist das strömende Medium kompressibel (Gas), so folgt mit Hilfe des Boyle-Mariotteschen Gesetzes $p \cdot V = \text{const.}$ und der Forderung, daß die Massendichte räumlich konstant ist:

$$Q = K \cdot \frac{A}{\eta L} \cdot \frac{(p_e - p_a)(p_e + p_a)}{2 p_m},$$

dabei ist p_m der Absolutdruck, bei dem der Volumenstrom Q gemessen wird. Auflösung nach dem Permeabilitätskoeffizienten K liefert

$$K = Q \cdot \frac{\eta L}{A} \cdot \frac{2 p_m}{(p_e - p_a)(p_e + p_a)}$$

Erfolgen die Ausströmung und die Messung des Volumenstromes bei Atmosphärendruck, so vereinfacht sich obige Gleichung zu

$$K = \frac{Q \eta L}{A} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-5}}{(p_e^2 - 1)},$$

wobei p_e in bar einzusetzen ist.

Im Experiment werden häufig Abweichungen von der angegebenen Druckabhängigkeit festgestellt und i.a. auf turbulente Strömung in einem Teil des Porennetzes zurückgeführt.

Bei ortsabhängiger Stromdichte, wie sie z.B. bei der Strömung zwischen nicht parallelen Grenzflächen auftritt, ist L/A durch einen zunächst unbekannten Geometriefaktor zu ersetzen, der selbst auch von K abhängen kann.

3. Literaturlauswertung: Dichtigkeitstprüfung an Bauwerksbeton

Bei den in der Literatur angegebenen Verfahren zur Dichtigkeitstprüfung am Bauwerk kann häufig sowohl Wasser wie auch Gas als strömendes Medium verwendet werden, daher erscheint eine Einteilung hinsichtlich der erfaßten Schichtdicke sinnvoller.

Dabei ist zu unterscheiden zwischen Methoden, die nur die Permeabilität einer dünnen (wenige Millimeter) Oberflächenschicht messen, und solchen,

die einen irgendwie gewichteten Mittelwert der Permeabilität einer mehrere Zentimeter dicken Deckschicht bestimmen.

3.1. Oberflächen-Meßverfahren

Bei dem von Levitt /15, 16, 17/ entwickelten und in British Standard 1881 /18/ übernommenen Initial Surface Absorption Test (ISAT) wird eine Meßkappe dicht auf der Betonoberfläche befestigt und mit Wasser gefüllt. Ein Druck von 200 mm WS wird mit Hilfe eines Reservoirs aufgebracht. Zu vereinbarten Zeitpunkten nach Füllung der Apparatur mit Wasser werden Momentanwerte der zeitabhängigen Wasseraufnahmegeschwindigkeit ermittelt. Hohe Meßgenauigkeit und Auflösung werden dadurch erreicht, daß für die Dauer der Messung die Verbindung zwischen Meßkappe und Wasserreservoir geschlossen wird und die weitere Wasseraufnahme aus einer engen, skalierten, horizontal angeordneten Glaskapillare erfolgt.

Für die Beurteilung der Schlagregendichtigkeit von Mauerwerk wurde dieses Verfahren in einfacherer Form - Reservoir und Meßrohr identisch, daher geringere Auflösung - schon 1960 von Karsten /19/ angegeben.

Höhere Wasserdrücke werden von Montgomery und Adams /20,21/ (1,4 bar) und bei einem kommerziellen Gerät /22/ (bis 4 bar) angewendet, dabei wird der Druck mit Hilfe eines Kolbens erzeugt, der in das geschlossene Wasserreservoir eintaucht. Die Messung der Kolbenbewegung mit Hilfe einer Mikrometerschraube erlaubt die Bestimmung der aufgenommenen Wassermenge.

Steinert /23/ verwendet zwei konzentrische Wasserkammern mit gleichem Druck (bis 10 bar mittels Druckluft), um eindimensionale Strömung unter der inneren Kammer zu erreichen (Schutzring-Prinzip). Nur die aus der inneren Kammer aufgenommene Wassermenge wird gemessen.

Schönlin und Hilsdorf /24, 25/ benutzen eine Meßkappe ähnlich wie beim ISAT-Verfahren, allerdings ist das strömende Medium Luft, und innerhalb der Meßkappe wird mit Hilfe einer Pumpe Unterdruck erzeugt. Die mit einem Elastomer-Dichtring versehene Kappe saugt sich dabei auf der Betonoberfläche fest und braucht nicht eigens befestigt zu werden, dadurch ist der

Zeitaufwand sehr gering, und Beschädigungen der Oberfläche entfallen völlig. Der vermutlich hauptsächlich unterhalb der Randabdichtung in die Meßkappe eintretende Luftstrom wird über die Druckanstiegsgeschwindigkeit nach Schließen der Saugleitung zur Pumpe gemessen.

Die für dieses Verfahren notwendigen Geräte werden kommerziell angeboten /26/.

3.2. Deckschicht-Meßverfahren

Allen diesen Verfahren ist gemeinsam, daß durch ein Bohrloch - i.a. senkrecht zur Betonoberfläche - eine Deckschicht von einigen Zentimetern Dicke der Permeabilitätsmessung zugänglich gemacht wird.

Figg /27/ verwendet ein 30 mm tiefes Loch mit \varnothing 5,5 mm, das in seinem oberen Teil mit Schaumstoff und Silikonkautschuk verschlossen wird. Nach Durchhärtung des Silikonkautschuks (Wartezeit!) wird die Abdichtung mit einer Injektionsnadel durchstoßen. Danach kann im Inneren des Bohrlochs entweder Unterdruck erzeugt und die von der Oberfläche her zuströmende Luftmenge über die Druckanstiegsgeschwindigkeit - wie beim Verfahren von Schönlin und Hilfsdorf - gemessen werden; alternativ ist es möglich, das Bohrloch mit Wasser zu füllen und wie beim ISAT-Verfahren die Wasseraufnahme durch die Bohrlochwandung zu bestimmen.

Verbesserungsvorschläge verschiedener Autoren betreffen die Vergrößerung von Bohrloch-Durchmesser und/oder -Tiefe /28 - 31/, die luftblasenfreie Füllung des Loches mit Wasser /30, 31/ sowie eine einfacher zu handhabende Abdichtung /31/. Mit den beiden erstgenannten Maßnahmen soll eine erhebliche Verminderung der Meßwertstreuungen (von ca. 40 % auf ca. 8 %) erzielt werden /31/.

Reinhardt und Mitarbeiter /32, 33/ bringen im Bohrloch-Inneren einen Stickstoff-Überdruck von 10 bar auf und messen die Druckabfallgeschwindigkeit, d.h. die Strömungsrichtung des Gases ist umgekehrt. Die Abdichtung des Loches (\varnothing 14 mm, 40 mm tief) erfolgt mit einem Injektionspacker mit Gummi-Spreizdichtung.

Parrott und Zhang Hong /34, 35/ ergänzen dieses Verfahren um eine der Permeabilitätsmessung vorausgehende Messung der Ausgleichs-Luftfeuchte im Bohrloch, um so einen Anhaltspunkt für den Feuchtegehalt des umgebenden Betons zu gewinnen. Außerdem weisen sie den Gasaustritt aus der das Bohrloch umgebenden Betonoberfläche mit Hilfe von Seifenlösung nach und können so Risse und Abdichtungsfehler erkennen, die sonst das Meßergebnis verfälschen würden.

Hansen, Ottosen und Petersen /36/ schlagen einen deutlich anderen Versuchsaufbau vor: mit einem langen Diamantbohrer mit \varnothing 18 mm wird unter einem Winkel von 8° zur Betonoberfläche ein Loch so weit gebohrt, daß der Bohrlochgrund die gewünschte Tiefe von einigen Zentimetern unter der Oberfläche erreicht. Darüber wird eine Kappe dicht auf die Oberfläche aufgesetzt und darin ein Gasdruck von 1,5 bar aufgebracht. Der Gasstrom von der Betonoberfläche zum Bohrloch wird über die Druckanstiegsgeschwindigkeit in dem abgedichteten Loch ermittelt.

Speziell für den Nachweis von Wasserabscheidungen unter Zuschlagskörnern empfehlen die gleichen Autoren, zwei ca. 25 mm tiefe Löcher senkrecht zur Oberfläche im Abstand von ca. 25 mm zu bohren, in dem einen Loch einen Gasdruck von 50 bar aufzubringen und den aus dem anderen Loch austretenden Gasstrom zu messen.

Tanahashi und Mitarbeiter /37/ geben ein Verfahren an, um an dünnen Wänden die über den Wandquerschnitt gemittelte Wasseraufnahme zu bestimmen. Dazu wird ein durchgehendes Loch mit \varnothing 3,5 cm gebohrt, mit Hilfe eines hohlen Stahlbolzens werden zwei Stahlscheiben mit Dichtung auf beiden Seiten des Loches an die Wandoberfläche gepreßt und die Innenoberfläche der Bohrung mit Wasserdruck beaufschlagt.

3.3. Beurteilung

Weitere Angaben zur praktischen Bewährung der in Lit. /15 - 37/ beschriebenen neuen oder wesentlich veränderten Meßverfahren, zu Meßergebnissen und ihrer Korrelation mit betontechnologischen Parametern finden sich in /38 - 47/.

Bei der Auswahl des Meßmediums (Gas/Wasser) sind folgende Gesichtspunkte zu betrachten:

- Bei Wasser unter niedrigem Druck und bei ungerissenem Beton überwiegt der Transport durch kapillares Saugen die Permeation (z.B. bei 10 bar: in Poren mit Radien $< 150 \text{ nm}$ / $> 150 \text{ nm}$ überwiegend kapillares Saugen/Permeation). Dementsprechend sollte die genaue Höhe des Wasserdrucks keinen oder nur geringen Einfluß auf die Aufnahmemenge haben. Soweit bekannt, wurde dieser Punkt experimentell noch nicht überprüft.
- Bei nicht vollständig hydratisiertem Zementstein sind bei Einwirkung von Wasser, je nach Dauer der Messung, Änderungen der zu messenden Größe zu erwarten.
- Mit Wasser kann nur Überdruck angewendet werden.
- Eine Messung mit Gas kann zur Überprüfung unmittelbar wiederholt werden, was bei Wasser wegen der Füllung des Porensystems nicht möglich ist.
- Bei Wasser ist die Temperaturabhängigkeit der Viskosität deutlich größer als bei Gasen und sollte bei der Messung berücksichtigt werden.

Zur Auswahl zwischen Meßverfahren, die nur die Oberfläche oder eine Deckschicht größerer Dicke erfassen, ist anzumerken:

- Wegen der bekanntermaßen starken Abhängigkeit der Permeabilität des Betons von dessen Feuchtegehalt reagieren Oberflächenmessungen stärker auf Witterungseinflüsse. Im allgemeinen wird daher empfohlen, nach Regenfällen erst eine mindestens 2-tägige Abtrocknungszeit abzuwarten. Demgegenüber ist bei Meßverfahren, die über die Permeabilität einer

einige Zentimeter dicken Deckschicht mitteln, ein wesentlich geringerer Witterungseinfluß zu erwarten, was durch eigene Messungen (siehe Abschnitt 5.4) bestätigt wird.

- Für den speziellen Fall, daß an jungem Beton unmittelbar nach Beendigung der Nachbehandlung (Ausschalen, Entfernen einer Abdeckung o.ä.) der Erfolg der bisherigen Nachbehandlungsmaßnahmen zu überprüfen ist, sind allerdings Oberflächenmessungen angezeigt, wobei das Verfahren von Schönlin und Hilsdorf /24, 25/ sich durch völlige Zerstörungsfreiheit und besondere Einfachheit auszeichnet.

Bei Bauwerksmessungen mit Wasser als Meßmedium wird i.a. nur der instationäre Wassereindringvorgang beobachtet (Eindringtiefe und integrale Wasseraufnahme $\sim \sqrt{t}$). Nur Montgomery /21/ gibt an, daß nach eintägigem Vornässen der Oberfläche eine zeitproportionale Wasseraufnahme erfolgt.

Mit Gasen wird, je nach Dichtigkeit des Betons, schon relativ kurze Zeit (einige Minuten bis ca. 30 Minuten) nach Anlegen des Druckes ein stationärer Durchfluß erreicht. Diese Wartezeit kann allerdings zu lang sein, wenn aus Gründen der Einfachheit mit einer Handpumpe gearbeitet wird. Wegen der Kompressibilität des Gases sind deutliche Unterschiede zwischen den Stromdichteverteilungen unmittelbar nach Aufbringen einer Druckdifferenz und im stationären Zustand zu erwarten.

Alle Bauwerksverfahren, die mit Gas arbeiten, verwenden als Beurteilungsgröße die Schnelligkeit des Druckausgleichs zwischen Meßfläche bzw. -bohrung und Umgebung, also eines ebenfalls instationären Vorganges. Durch Messung der Zeitdifferenz zwischen zwei unterschiedlichen Druckniveaus wird dieser exponentiell verlaufende Vorgang willkürlich linearisiert. Das Meßergebnis hängt daher - außer von der Permeabilität des Betons - von der Druck-Vorgeschichte vor der Messung, den Druckniveaus bei der Messung und der Größe des in der Apparatur eingeschlossenen Gasvolumens ab. Reproduzierbare Messungen sind somit nur zu erwarten, wenn diese Parameter sorgfältig konstant gehalten werden, auf unterschiedliche Art (Apparatur und/oder Meßbedingungen) gewonnene Ergebnisse sind nicht miteinander vergleichbar. Wünschenswert wäre die Messung des Gasvolumenstromes bei stationären Druck- und Strömungsverhältnissen, was von keinem der genannten Verfahren geleistet wird.

Während bei Labormessungen der Gas- oder Wasserpermeabilität durch geeignete Wahl der Probengeometrie (Scheiben mit planparallelen Oberflächen) eine - zumindest bei Vernachlässigung von Inhomogenitäten des Betons - eindimensionale Strömung erreicht und so der Permeabilitätskoeffizient ermittelt werden kann (vergl. Abschnitt 2), ist die Strömung bei den Bauwerksverfahren i.a. mehrdimensional, die Stromdichte also ortsabhängig und das oft in unbekannter Weise.

Steinert /23/ erreicht durch das Schutzringprinzip unterhalb der Meßfläche eine ebene Wassereindringfront, bei Tanahashi /37/ ist die Eindringfront zylinderförmig und bei den Bohrlochverfahren zumindest näherungsweise zylinder- oder kugelförmig je nach dem Verhältnis Länge/Durchmesser des offenen Teils des Bohrloches, d.h. die theoretische räumliche Stromdichteverteilung ist analytisch einfach beschreibbar.

Dagegen liegen bei Gasströmungen zwischen benachbarten Bereichen der Oberfläche oder zwischen einem teilweise versperrten Bohrloch und der Oberfläche stark gekrümmte Stromlinien mit - auch wegen der Kompressibilität des Gases - analytisch nicht angebbarer Stromdichteverteilung vor. Damit ist zunächst nur ein verfahrensspezifisches Permeabilitätsmaß bestimmbar, eine Umrechnung in den Permeabilitätskoeffizienten wird nur von Zhang Hong und Parrott /35/ anhand (anzweifelbarer) Annahmen über die Strömungsverteilung und von Schönlin /25 / durch Vergleich mit Labormessungen bei eindimensionaler Durchströmung vorgenommen.

Schließlich ist zu den Bohrlochverfahren anzumerken, daß nach eigenen Erfahrungen die Abdichtung des Bohrloches problematisch ist, sei es, daß Gummi-Spreizdichtungen sich nur unvollkommen an die raue Bohrlochwandung anlegen, sei es, daß beim Bohren mit Schlagbohrmaschine oder Bohrhammer Risse in der unmittelbaren Umgebung des Loches entstehen.

Bei allen Meßverfahren liegen solche Leckstellen parallel zum regulären Strömungsweg des Gases und können das Meßergebnis in unkontrollierbarer Weise verfälschen. Allein Parrott und Zhang Hong /34, 35/ gehen auf dieses

Problem ein und ermöglichen das Erkennen leckbehafteter Meßstellen, indem sie die Gasaustrittsstellen in der Betonoberfläche durch Seifenlösung sichtbar machen.

4. Meßverfahren

4.1 Zielsetzung

Für Bauwerksmessungen der Permeabilität von Betonoberflächen oder oberflächennahen Schichten kommen verschiedene Zeitpunkte und Zielsetzungen in Frage:

- an wenige Tage altem Beton, um über Beendigung oder Fortsetzung von Nachbehandlungsmaßnahmen zu entscheiden,
- im Zuge der Bauabnahme, d.h. im Betonalter von mehreren Wochen bis mehreren Monaten, um das Vorhandensein evtl. vertraglich vereinbarter Betoneigenschaften nachzuweisen, Dauerhaftigkeitserwartungen abzuschätzen oder Nachbesserungsforderungen zu begründen,
- zu späteren Zeitpunkten, vor oder nach Manifestation von Korrosionsschäden, um eine wirtschaftliche Bauwerksunterhaltung oder -sanierung durchführen zu können.

Aus verschiedenen, oben dargelegten Gründen erscheint für den ersten Anwendungsfall das Verfahren von Schönlin und Hilsdorf /24, 25/ optimal geeignet. Für die beiden anderen Anwendungsfälle wird grundsätzlich ein Deckschicht-Verfahren mit Gas als Meßmedium bevorzugt, weil es die gesamte für den Korrosionsschutz der Bewehrung maßgebliche Betondeckung integral erfaßt und zu beurteilen gestattet. Die bei Beginn der eigenen Arbeiten (1986) bekannten Verfahren konnten jedoch aus den oben genannten Gründen nicht restlos befriedigen, die wichtigsten Vorgaben für eine eigene Weiterentwicklung waren die Sicherheit gegenüber Leckstellen in der Abdichtung des Bohrloches sowie die zeitliche Konstanz der Druck- und Strömungsverhältnisse.

4.2. Beschreibung des Verfahrens

Nach Vorversuchen zur Festlegung von Geometrieparametern, über die im nächsten Abschnitt berichtet wird, wird zur Messung der Permeabilität oberflächennaher Betonschichten am Bauwerk folgendes Verfahren angewendet, vergl. Anlage 1:

- Senkrecht zur Betonoberfläche wird ein Loch mit 11 mm Durchmesser gebohrt, Bohrtiefe \approx zu untersuchende Schichtdicke +15...20 mm (Schlagbohrmaschine oder Bohrhammer mit hartmetallbestücktem Bohrer).
- Ein Injektionspacker mit Gummispreizdichtung, Durchmesser 10 mm, wird so in das Bohrloch eingesetzt und verspannt, daß er die Bohrlochwand über die Dicke der zu untersuchenden Betonschicht abdichtet (typisch ca. 25 mm, möglich 8...> 40 mm).
- Über die Bohrung des Packers wird im nicht abgedichteten Teil des Bohrloches ein Gasdruck von 2 bar aufgebracht.
- In einer kreisringförmigen Umgebung des Bohrloches wird das aus der Betonoberfläche ausströmende Gas mit Hilfe eines entsprechend geformten Sammelgefäßes aufgefangen (flacher, ringförmiger Deckel mit 30 mm innerem Durchmesser und 100 mm äußerem Durchmesser). Die unmittelbare Umgebung des Bohrloches wird also ausgespart, so daß Lecks in dessen Abdichtung ohne Einfluß bleiben!
- Am Ausgang des Gassammlers erfolgt die Messung des stationären Gasdurchflusses.

Im Detail wird dabei wie folgt vorgegangen:

Als Gas wird, weil im Institut vorhanden, nachgereinigter Stickstoff aus einer Druckgasflasche verwendet. (Jedes andere trockene, ölfreie, im Beton inerte Gas sollte, ggf. bei Berücksichtigung abweichender Viskosität, gleichermaßen geeignet sein.) Mit einem Reduzierventil einfacher Bauart kann der Druck von 2 bar genügend genau und zeitstabil eingestellt werden. Die Druckmessung erfolgt mit einem batteriebetriebenen Digitalmanometer.

Der Gummischlauch des Injektionspackers wird vor dem Einführen in das Bohrloch dünn mit Vaseline bestrichen, um die Abdichtwirkung gegenüber der rauhen Bohrlochwand zu verbessern. Ziel dieser Maßnahme ist nicht die Vermeidung von Leckströmen an sich - die ja wegen der Ringform des Gassammlers bei der Messung nicht erfaßt würden -, sondern die definierte Begrenzung des druckbeaufschlagten Teiles des Bohrloches und damit der Dicke der durchströmten Betonschicht.

Der Gassammler wird an vertikalen Oberflächen mit Hilfe eines am Injektionspacker befestigten Federbügels angedrückt, an horizontalen Oberflächen ist kein Andruck erforderlich. Die Abdichtung gegen die Betonoberfläche erfolgt mit Vaseline, die mit einem kleinen Spatel in die Kehle zwischen Beton und Sammlerwandung gestrichen wird. Bei nur geringem Überdruck im Gassammler (≤ 1 mbar, s.u.) wird so völlige Dichtigkeit auch auf rauhen Oberflächen erreicht.

Die Messung des vom Sammler aufgefangenen Gasvolumenstromes sollte im Idealfall völlig drucklos erfolgen. Schon bei geringem Überdruck (wenige mbar) im Sammler tritt eine Querströmung unter dessen Rand hinweg ins Freie auf, die insbesondere bei relativ porösem Beton das Meßergebnis verfälscht. Sehr gut geeignet sind Seifenblasen-Strömungsmesser, als brauchbar hat sich auch die Messung der Verschiebungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeitssäule in einer schwach geneigten Glaskapillare bekannten Durchmessers erwiesen (Höhenunterschied 10 mm, sog. Schrägrohrmanometer mit Meßbereich 1 mbar).

Mit dem letztgenannten Gerät wurde zwar häufig schon eine geringfügige Abnahme des Volumenstromes mit steigendem Gegendruck beobachtet, es bietet jedoch den Vorteil, daß vor der Messung die Abdichtung des Gassammlers einfach kontrolliert werden kann: Nach Aufbringen eines Überdruckes ≤ 1 mbar durch Einblasen mit dem Munde sollte innerhalb etwa einer Minute kein Druckabfall feststellbar sein.

Nach Anlegen des Druckes am Injektionspacker stellt sich die stationäre Durchströmung erst mit einer gewissen Verzögerung ein. Eine Wartezeit von ca. 15 Minuten bis zur Messung des Durchflusses hat sich als ausreichend erwiesen.

Als Vorteile des beschriebenen Verfahrens sind zu nennen:

- einfache, zerstörungsarme (1 Bohrloch Ø 11 mm) Durchführung, das Loch kann freihändig mit üblichem Werkzeug gebohrt werden,
- die Dicke der untersuchten Betonschicht ist innerhalb der sinnvoll erscheinenden Grenzen (\approx Überdeckung der Bewehrung) frei wählbar und bekannt,
- Undichtigkeiten der Hochdruckseite und eventuelle Risse in der Bohrlochwand beeinflussen nicht das Ergebnis, weil der austretende Gasstrom gemessen und die unmittelbare Umgebung des Bohrloches ausgespart wird,
- die Messung erfolgt bei stationären Druck- und Strömungsverhältnissen,
- das Gassammelgefäß ist drucklos (bei Messung mit Seifenblasen-Strömungsmesser; mit Schrägrohrmanometer maximal 1 mbar), die Abdichtung mit Vaseline ist auch auf sehr rauhen Betonoberflächen (Unebenheiten ca. 5 mm) unproblematisch,
- die Messung mittelt über ein abschätzbares, nicht zu kleines Betonvolumen, dadurch wird die Streuung der Resultate und infolgedessen die Anzahl der für eine sichere Beurteilung erforderlichen Messungen vermindert,
- das Gas strömt im wesentlichen senkrecht zur Betonoberfläche, d.h. in der Transportrichtung von Schadstoffen,
- es ist eine Kalibrierung des Verfahrens derart möglich, daß direkt der Permeabilitätskoeffizient - definiert für eindimensionale Strömung - des Betons angegeben wird (vergl. Abschnitt 4.6.).

4.3. Geometrieparameter

4.3.1. Durchmesser der Gaseinlaßbohrung

Im Hinblick auf die Beschädigungen der zu untersuchenden Betonoberflächen ist ein möglichst kleiner Durchmesser der Gaseinlaßbohrung erwünscht.

Andererseits berichten Dhir, Hewlett und Chan /31/, daß bei Messungen der Gaspermeabilität nach dem Verfahren von Figg /27/ allein durch Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers von 10 mm auf 13 mm der Variationskoeffizient der Meßwerte von 32 % auf 17 % gesenkt werden konnte.

Eigene Versuche konnten diesen Einfluß nicht bestätigen: je 8 Permeationsmessungen mit Lochdurchmessern von 11 mm und 14 mm, gleichmäßig auf den Mantelflächen eines 30cm-Würfels verteilt, ergaben Variationskoeffizienten des Gasvolumenstromes von 36 % bzw. 58 %, also den gegenteiligen Effekt!

Für alle weiteren Versuche wurden daher Injektionspacker mit \varnothing 10 mm in Bohrlöchern mit \varnothing 11 mm verwendet.

Die Mittelwerte der Volumenströme bei o.g. Messungen verhielten sich wie 1:1,68. Das bedeutet einen überproportionalen Einfluß des Lochdurchmessers, der jedoch nicht genauer untersucht wurde.

4.3.2. Innendurchmesser des Gassammlers

Der innere Durchmesser des Gassammlers sollte möglichst klein sein, um einen großen Teil des austretenden Gasstromes zu erfassen. Andererseits muß die Vaseline-Abdichtung leicht einzubringen sein und die möglicherweise durch den Bohrvorgang rissegeschädigte Umgebung des Bohrloches hinreichend weit aussparen. Ein innerer Durchmesser von 30 mm wurde als guter Kompromiß empfunden und nicht variiert.

(Der für die Gasströmung wirksame innere Durchmesser ist dabei kleiner: geht man davon aus, daß die Vaseline-Abdichtung die Betonoberfläche innerhalb eines Ringes mit 20 mm innerem und 30 mm äußerem Durchmesser gasdicht

verschließt, so wird der Gasstrom, der ohne Behinderung in diesem Bereich austreten würde, im Mittel etwa je zur Hälfte in den Sammler und ins Freie umgelenkt werden. Als wirksamer innerer Durchmesser wäre demnach etwa 25 mm anzusetzen.)

4.3.3. Außendurchmesser des Gassammlers

Vergleichende Messungen mit Gassammlern mit 100 mm und 150 mm Außendurchmesser ergaben Gasvolumenströme im mittleren Verhältnis 1:1,17 (14 Messungen an Betonen unterschiedlicher Permeabilität, Schichtdicke 25 mm). Die Zunahme des Gasstromes ist also erheblich geringer als die des Außendurchmessers oder gar der überdeckten Fläche (1:1,5 bzw. 1:2,37), d.h. die Stromdichte nimmt in größerem Abstand vom Bohrloch stark ab.

Auszählen der durch Seifenlösung sichtbar gemachten Gasaustrittsstellen an der Betonoberfläche ergab im Mittel einen Anteil von ca. 90 % innerhalb eines Kreises mit 50 mm Radius um die Eintrittsbohrung (durchströmte Schichtdicke 25 mm). Parrott und Zhang Hong /34, 35/ beobachteten Gasaustritte sogar nur in einem Umkreis mit 35...40 mm Radius um die Bohrung, allerdings bei einer Schichtdicke von 20 mm.

Es ist also davon auszugehen, daß bei üblichen Werten der durchströmten Schichtdicke (\approx Betondeckung) ein Gassammler mit Außendurchmesser 100 mm den weitaus größten Teil des an der Betonoberfläche austretenden Gasstromes erfaßt. Der größere Sammler (\varnothing 150 mm) wurde daher nicht weiter verwendet.

4.3.4 Tiefe der Einlaßbohrung

Die Tiefe der Gaseinlaßbohrung wurde in mehreren Versuchen im Bereich von ca. 25...75 mm variiert. Bei jeweils gleicher Lage des Injektionspackers, also gleicher Länge des abgedichteten Teiles der Bohrlochwandung, wurde dabei keine signifikante Änderung des vom Sammler erfaßten Gasstromes festgestellt.

4.3.5 Durchströmte Schichtdicke

Die in den beiden vorhergehenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, daß bei der Gasströmung in einem ausgedehnten Betonvolumen die kürzest möglichen Strömungspfade den größten Beitrag zum gesamten Gasvolumenstrom erbringen. Die an der Bohrungswandung in den Beton eintretende Stromdichte wird demnach an der Unterkante des Injektionspackers am größten sein und in zunehmender Tiefe schnell abfallen. Damit ist es gerechtfertigt, die Tiefe des vom Packer abgedichteten Teiles des Bohrlochs mit der durchströmten Schichtdicke des Betons gleichzusetzen.

An 8 Meßstellen an Betonoberflächen unterschiedlicher Permeabilität wurde in insgesamt 44 Einzelmessungen die durchströmte Schichtdicke im Bereich von 9 bis 50 mm variiert. Es ergab sich eine Abhängigkeit des aufgefangenen Gasvolumenstromes Q (Sammler mit 100 mm Außendurchmesser) von der Schichtdicke x [mm], die am besten durch die Gleichung

$$Q(x)/Q(25) = (x/25)^{-1,47}$$

beschrieben wird (Korrelationskoeffizient $r = 0,95$), vergl. Anlage 2.

Der Bezugswert $x = 25$ mm wurde gewählt, weil dieses Maß in einer Vielzahl von Fällen dem Erwartungswert der Betondeckung entspricht und daher auch bei den hier durchgeführten Untersuchungen bevorzugt verwendet wurde.

Wenn bei deutlich abweichender Betondeckung oder aus anderen Gründen andere Schichtdicken als $x = 25$ mm untersucht werden sollen, erlaubt die obige Beziehung eine Umrechnung der Gasvolumenströme innerhalb des untersuchten Bereichs $9 \text{ mm} \leq x \leq 50 \text{ mm}$.

4.4. Einfluß des Eingangsdruckes

Bei Gültigkeit des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes ist für die Strömung eines kompressiblen Gases durch ein poröses Material folgende Abhängigkeit des Gasvolumenstromes Q von Eingangsdruck p_e und Ausgangsdruck p_a zu erwarten, vergl. Abschnitt 2:

$$Q \sim \frac{p_e^2 - p_a^2}{p_a}$$

Dabei sind die Drücke mit ihren Absolutwerten einzusetzen , außerdem ist vorausgesetzt, daß die Messung des Volumenstroms auf der Ausgangsseite (d.h. beim Druck p_a) erfolgt.

Bei Ausströmung gegen Atmosphärendruck wird

$$Q \sim (p_e^2 - 1) \quad (p_e \text{ in bar}).$$

Die Gültigkeit dieser Beziehung wurde bei Eingangsdrücken von 1,5...4,0 bar absolut (d.h. 0,5...3,0 bar Überdruck) überprüft, und zwar sowohl mit dem Bauwerksverfahren (d.h. bei zweidimensionaler, räumlich inhomogener Strömung) wie auch in der Permeabilitätsmeßzelle (eindimensionale, homogene Durchströmung von planparallelen Scheiben, s.u.).

Es zeigte sich, daß - wie auch von /12/ berichtet - die Meßwerte die o.g. theoretische Beziehung nicht genau erfüllen; es wurde vielmehr, und zwar übereinstimmend bei beiden Meßverfahren, ein Zusammenhang

$$Q \sim (p_e^2 - 1)^a \quad \text{mit } a \approx 0,91$$

gefunden.

4.5 Permeabilitätsmaß

Faßt man die experimentell ermittelten Abhängigkeiten des vom Gassammler aufgefangenen Volumenstromes Q vom Eingangsdruck p_e und der durchströmten Schichtdicke x sowie die nicht überprüfte Abhängigkeit von der Viskosität des Meßgases zusammen, so gilt

$$Q \sim \frac{1}{\eta} \cdot (p_e^2 - 1)^{0,91} \cdot \left(\frac{25}{x}\right)^{1,47}$$

Es erscheint sinnvoll, die Proportionalitätskonstante als das verfahrensabhängige - insbesondere Gassammler mit 30 mm innerem und 100 mm äußerem Durchmesser, Gaseinlaßbohrung mit 11 mm Durchmesser - Permeabilitätsmaß M zu definieren:

$$M = Q \cdot \eta \cdot (p_e^2 - 1)^{-0,91} \cdot \left(\frac{x}{25}\right)^{1,47} \quad (1)$$

Da es sich wegen der gebrochenen Exponenten ohnehin nur um eine Zahlenwertgleichung handelt, können alle Größen in bequem zu handhabenden Einheiten eingeführt werden:

Q	Gasvolumenstrom in mm^3/s
η	Viskosität in $10^6 \text{ Ns}/\text{m}^2$
p_e	Eingangsdruck absolut in bar
x	durchströmte Schichtdicke in mm.

(Der Druckexponent -0,91 kann näherungsweise gleich -1 gesetzt werden. Der dadurch verursachte Fehler des Permeabilitätsmaßes ist von p_e abhängig und beträgt bei $p_e = 3,0$ bar absolut (2,0 bar Überdruck) ca. -17 %. In Anbetracht der großen örtlichen Streuungen der Permeabilität von Betonoberflächen, vergl. Abschnitt 5.2., ist diese Abweichung vernachlässigbar. Insbesondere ist die Vergleichbarkeit von Meßergebnissen nicht beeinträchtigt, wenn immer mit dem gleichen Eingangsdruck gearbeitet wird.)

4.6. Kalibrierung zur Messung des Permeabilitätskoeffizienten

Eine Korrelation des oben eingeführten, verfahrensabhängigen Permeabilitätsmaßes mit dem für eindimensionale Durchströmung definierten Permeabilitätskoeffizienten ist zwar für Vergleiche von Bauwerksmessungen untereinander nicht erforderlich, für Vergleiche mit Labormessungen jedoch wünschenswert. Einfache Näherungsannahmen über den Strömungsverlauf, wie sie von Parrott und Zhang Hong /34, 35/ zur Umrechnung verwendet werden, erscheinen wegen der Kompressibilität des Gases fragwürdig, es wurden daher Vergleichsmessungen durchgeführt.

Dabei erschien es wegen der großen örtlichen Streuungen der Permeabilität (siehe Abschnitt 5.2.) unerlässlich, beide Verfahren nacheinander an genau den gleichen Betonvolumina anzuwenden. An Betonwürfeln mit 15 cm Kantenlänge wurde daher zunächst das Permeabilitätsmaß nach dem Bauwerksverfahren ermittelt (Sammeler-Ø 100 mm, durchströmte Schichtdicke 25 mm), danach wurde genau an der Meßstelle eine kreiszylindrische Scheibe mit Ø 100 mm und Dicke 25 mm entnommen und deren Permeabilitätskoeffizient in einer dafür gebauten Meßzelle bestimmt.

Um auch den Einfluß von Feuchteänderungen infolge der nassen Präparation der Scheiben auszuschalten, wurden zunächst alle Messungen nach Trocknung des Betons bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz durchgeführt. Die dabei zu erwartende Veränderung der Permeabilität durch Mikrorißbildung wurde hingegen, weil sie beide Messungen betraf, den Vergleich beider Verfahren also nicht beeinträchtigte.

Es zeigte sich jedoch, daß bei der Trocknung die Permeabilität stark anstieg und außerdem Permeabilitätsunterschiede zwischen verschiedenen Betonen wesentlich vermindert wurden (siehe Abschnitt 5.3.), so daß es nicht möglich war, den baupraktisch interessierenden und meßtechnisch zugänglichen Bereich des Permeabilitätskoeffizienten von mindestens 3 Zehnerpotenzen ($10^{-18} \text{ m}^2 \lesssim K \lesssim 10^{-15} \text{ m}^2$) durch Vergleichsmessungen abzudecken.

Da sich bei Messungen an freibewitterten Versuchswänden (siehe Abschnitt 5.4.) herausgestellt hatte, daß die Permeabilität einer mehrere Zentimeter dicken Betonschicht zeitlich sehr stabil ist und durch kurzzeitige oberflächliche Befeuchtung nicht nachhaltig verändert wird, wurde bei weiteren Versuchen auf die Trocknung des Betons verzichtet. Aus freibewitterten Bauteilen (Würfel, Wände) wurden unmittelbar nach der Messung nach dem Bauwerksverfahren Scheiben naß entnommen, nach eintägiger oberflächlicher Abtrocknung in die Meßzelle eingebaut und dort sofort wieder gemessen. Daß dabei Feuchtegehalt und -verteilung nicht nennenswert verändert wurden, konnte naturgemäß nicht nachgewiesen werden, wird aber nach den o.g. Ergebnissen für ausreichend sicher gehalten.

So wurden 21 Wertepaare im Wertebereich $0,87 \leq M \leq 1760$ (Bauwerksverfahren) bzw. $1,7 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \leq K \leq 8,2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ (Meßzelle) ermittelt. Bei doppeltlogarithmischer Auftragung ergab sich mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,96$ eine Regressionsgerade entsprechend der Beziehung

$$K = 2,6 \cdot 10^{-18} \cdot M^{0,72} \text{ mit } K \text{ in } \text{m}^2, \quad (2)$$

siehe Anlage 3.

4.7. Meßbereich, Meßgenauigkeit

Mit Seifenblasen-Strömungsmessern oder Schrägrohrmanometern sind - bei nur teilweiser Ausnutzung der Skalenlänge und Meßzeiten von mehreren Minuten - Gasvolumenströme ab etwa $0,3 \text{ mm}^3/\text{s}$ meßbar. Das entspricht bei üblichen Meßbedingungen (Meßgas Stickstoff mit Eingangs-Überdruck 2 bar, durchströmte Schichtdicke 25 mm) einem minimalen Permeabilitätsmaß von $M \approx 0,8$ bzw. einem minimalen Permeabilitätskoeffizienten von $K \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$.

Nach oben ist der Meßbereich durch Seifenblasen-Strömungsmesser mit großem Querschnitt oder ggf. durch Schwebekörper-Durchflußmesser praktisch beliebig auszudehnen. Der baupraktisch interessierende Bereich der Permeabilität von Beton wird also überdeckt.

Die Meßgenauigkeit kann abgeschätzt werden, wenn die Einzelfehler der Messungen des Gasvolumenstromes, des Eingangsdruckes und der durchströmten Schichtdicke bekannt sind.

Der Fehler der Volumenstrommessung setzt sich zusammen aus dem Kalibrierungsfehler der Meßkapillare (Bürettenrohr, deutlich kleiner als 1 %), dem Ablesefehler und dem Fehler der Zeitmessung, die zusammen zu ca. 3 % angenommen werden (experimentell bestätigt, auch bei mehrfachem Abnehmen und Wiederaufsetzen des Gassammlers). Die Druckmessung erfolgt mit einem Manometer der Klasse 0,2; wird außerdem eine Einstelltoleranz von $\pm 0,5 \text{ bar}$ um den Sollwert 3,00 bar absolut zugelassen, so ist der Fehler $\leq 2 \text{ %}$. Die durchströmte Schichtdicke kann anhand der Länge des aus dem

Bohrloch herausragenden Teiles des Injektionspackers auf ± 1 mm genau gemessen werden (Schieblehre), so daß bei einem Sollwert von 25 mm der Fehler ca. 4 % beträgt.

Anhand der Gleichung 1 (Abschnitt 4.5.) ergibt sich damit der maximale Fehler des Permeabilitätsmaßes M zu ca. 14 %. Wegen des nichtlinearen Zusammenhanges zwischen M und K , siehe Gleichung 2 (Abschnitt 4.6), ist der maximale Fehler des Permeabilitätskoeffizienten K geringer, nämlich ca. 10 %.

5. Messungen nach dem "Bauwerksverfahren"

5.1. Untersuchungsobjekte

Für die hier beschriebenen Untersuchungen standen folgende Versuchskörper und Bauwerke zur Verfügung:

- 8 Versuchswände der Abmessungen 2,0 m x 1,7 m x 0,12 m aus 4 verschiedenen Betonen - im wesentlichen zwischen 0,50 und 0,98 variiertes w/z -Wert - bei je zwei verschiedenen Nachbehandlungsarten, die in der Zeit vom 27.07. bis 23.11.1987 hergestellt und nach Abschluß der Nachbehandlung auf dem Institutsgelände frei bewittert aufgestellt wurden, siehe Anlage 4,
- 24 Würfel mit 30 cm Kantenlänge, je 3 zu jeder der o.g. Versuchswände, die mit den Wänden zusammen im Freien gelagert wurden,
- 13 Gebäude unterschiedlichen Alters zwischen 1 und 38 Jahren, davon 6 (10 bis 36 Jahre alt) mit Schäden in Form von Korrosion der außenliegenden Bewehrung und Abplatzungen der Betondeckung. Soweit nähere Angaben zu diesen Gebäuden ermittelt werden konnten, sind sie in Anlage 5 zusammengestellt.

5.2. Werkstoffbedingte Streuungen

Der maximale Fehler des Meßverfahrens war in Abschnitt 4.7. zu ca. 14 % für M bzw. ca. 10 % für K abgeschätzt worden. Um festzustellen, wie groß die werkstoffbedingten örtlichen Streuungen der Permeabilität selbst sind, wurden an unterschiedlichen Betonen Meßreihen mit 8 bis 19 Einzelmessungen an dicht benachbarten Meßstellen aufgenommen, und zwar auf den Mantelflächen von 30cm-Würfeln sowie an Versuchswänden in gleichbleibender Höhe und unter Aussparung der Randbereiche.

In allen Fällen handelte es sich um Betone mit 32 mm Größtkorn. Die Wände waren mit Innen- und Schalungsrüttler, die Würfel nur mit Innenrüttler verdichtet worden.

In 6 Meßreihen ergaben sich für das Permeabilitätsmaß M Variationskoeffizienten von ca. 15...60 %, entsprechend ca. 10...45 % für den Permeabilitätskoeffizienten K, siehe nachfolgende Tabelle.

Meßreihe Nr. Versuchskörper	1 Würfel	2 Würfel	3 Wand	4 Würfel	5 Wand	6 Würfel	Einheit
Zahl der Einzelmessungen	15	8	9	19	9	8	-
Permeabilitätsmaß M: Mittelwert Variationskoeffizient	20,2 52,6	27,7 36,4	42,4 59,6	125 23,5	317 33,6	562 14,6	- %
Permeabilitäts- koeffizient K: Mittelwert Variationskoeffizient	21,9 39,0	27,9 26,8	37,1 44,0	83,0 17,5	161 24,5	245 10,4	$\cdot 10^{-18} \text{m}^2$ %

Die niedrigsten Werte der Variationskoeffizienten entsprechen recht genau den oben abgeschätzten jeweiligen Fehlergrenzen des Meßverfahrens, was - wegen der zusätzlich zu erwartenden werkstoffbedingten Streuungen - darauf hindeutet, daß diese Abschätzung zu ungünstig, die Messung tatsächlich also genauer ist. Die höheren Werte der Variationskoeffizienten übersteigen die möglichen Meßfehler z.T. beträchtlich, sind also im wesentlichen auf die Inhomogenität des Betons zurückzuführen.

- die mittlere Lufttemperatur und
- die mittlere Windgeschwindigkeit

entnommen bzw. berechnet, und zwar jeweils der Wert für den der Messung vorangehenden Tag sowie die Mittel- bzw. Summenwerte für die Zeiträume von 1, 2 und 3 Wochen vor der Messung. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Klimagröße	Korrelationskoeffizient r zwischen Permeabilitätskoeffizient und Mittelwert der Klimagröße im Zeitraum			
	1 Tag	1 Woche vor der Messung	2 Wochen vor der Messung	3 Wochen vor der Messung
Niederschlagshöhe	0,215	-0,012	-0,275	-0,575
Anzahl der Tage mit Niederschlagshöhe ≥ 1 mm	-	0,077	-0,301	-0,746
relative Luftfeuchte	-0,365	-0,476	-0,599	-0,754
mittlere Sonnenscheindauer	0,279	0,398	0,595	0,700
mittlere Lufttemperatur	0,467	0,549	0,583	0,627
mittlere Windgeschwindigkeit	0,176	-0,418	-0,627	-0,674

Beachtet man, daß bei Niederschlagshöhe, Zahl der Regentage und relativer Luftfeuchte ein negatives, bei Sonnenscheindauer, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit ein positives Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten der Erwartung entspricht (Befeuchtung \rightarrow sinkende Permeabilität, Austrocknung \rightarrow steigende Permeabilität), so erkennt man:

- die Permeabilität ist mit den Klimadaten des der Messung vorangehenden Tages praktisch nicht korreliert (z.T. sogar falsches Vorzeichen),
- werden Klima-Mittelwerte über längere Zeiträume vor der Messung betrachtet, so wird die Korrelation mit zunehmender Zeitdauer drastisch besser,

Die Auftragung der Tabellenwerte in Anlage 6 läßt eine systematische Abhängigkeit des Variationskoeffizienten vom Mittelwert der Permeabilität erkennen, wenn man die vergleichsweise höhere Streuung bei den Versuchswänden durch eine gegenüber den Würfeln weniger gleichmäßige Verdichtung erklärt. Die Tendenz dieser Abhängigkeit - abnehmender Variationskoeffizient bei zunehmender mittlerer Permeabilität - wird durch statistische Betrachtungen anhand eines einfachen Porenmodells, siehe Anlage 7, überraschend gut bestätigt.

Da also zumindest bei geringen Permeabilitäten werkstoffbedingt große Meßwertstreuungen zu erwarten sind, wurde untersucht, unter welchen Bedingungen Permeabilitätsmessungen überhaupt den Nachweis bestehender Dichtigkeitsunterschiede gestatten. Unter der Annahme, daß bei zwei zu vergleichenden Betonoberflächen die örtlich variierenden Permeabilitätskoeffizienten normalverteilt um die Mittelwerte $\bar{K}_1 \neq \bar{K}_2$ sind und gleiche Variationskoeffizienten von 50 % aufweisen, läßt sich mit Hilfe der t-Verteilung die Anzahl $n_1 = n_2$ von Messungen ermitteln, die erforderlich ist, um die Betone mit einer vorgegebenen statistischen Sicherheit als verschieden zu erkennen /48/.

Wie Anlage 8 zeigt, genügen z.B. bei einem Sicherheitsniveau von $S = 95\%$ und $\bar{K}_1/\bar{K}_2 \geq 3$ je 5 Messungen, während bei höherer statistischer Sicherheit und/oder geringerem Unterschied der Mittelwerte u.U. erheblich mehr Messungen erforderlich werden.

Das bedeutet, daß stichprobenartige ($n = 5 \dots 10$) Permeabilitätsmessungen zur groben Klassifizierung der Dichtigkeit - z.B. in drei Klassen: ausreichend dicht / fraglich / undicht - durchaus geeignet sind, während zum Nachweis geringerer Unterschiede erheblich mehr Messungen notwendig sein können.

5.3. Feuchteabhängigkeit der Permeabilität

Es ist bekannt, daß die Permeabilität von Beton stark von dessen Feuchtegehalt abhängt. Einige eigene Messungen wurden im Rahmen der oben (Abschnitt 4.6.) dargestellten Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Permeabilitätsmaß und -koeffizient durchgeführt.

An 12 Würfeln mit 15 cm Kantenlänge aus drei verschiedenen Rezepturen wurde zunächst die Permeabilität bei dem Feuchtegehalt gemessen, der sich bei Freibewitterung eingestellt hatte. Danach lagerten 4 Würfel zunächst 6 Wochen lang im Labor bei ca. 20 °C/50 % r.F. und dann bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei +105 °C, die übrigen 8 Würfel wurden gleich bei +105 °C getrocknet. Nach jedem Trocknungsschritt wurden wieder die Permeabilitäten gemessen.

Die Probleme einer Trocknung bei erhöhten Temperaturen - irreversible Strukturveränderungen und Rißbildung im Zementstein - sind bekannt, sie konnten für das eigentliche Ziel dieser Messungen - Vergleich zweier Permeabilitätsmeßverfahren nach Trocknung - vernachlässigt werden. Trotzdem wurde durch langsame Aufheizung und Abkühlung der Proben innerhalb jeweils mehrerer Tage versucht, die thermisch-mechanische Beanspruchung des Materials so gering wie möglich zu halten.

Die Auftragung der Ergebnisse in Anlage 9 zeigt ein Ansteigen des Permeabilitätskoeffizienten um den Faktor 3 bis 12 bei Verminderung des Feuchtegehaltes von 4 auf 0 Massen-%, dabei ist die Veränderung bei Proben mit hoher Anfangspermeabilität i.a. geringer als bei den im feuchten Zustand dichteren Proben. Wegen der möglichen Überlagerung von Trocknung und Rißbildung ist allerdings das hier beobachtete Ausmaß der Permeabilitätsänderung nur als obere Grenze für den Einfluß des Feuchtegehalts anzusehen, wie auch der Effekt der Angleichung ursprünglich stark unterschiedlicher Permeabilitäten ganz oder teilweise auf Rißbildung zurückzuführen sein kann.

5.4. Klimaeinfluß bei Messungen an freibewitterten Bauteilen

Um festzustellen, wie sich die Feuchteabhängigkeit der Permeabilität an freibewitterten Bauteilen auswirkt, wurden Messungen an einigen der Versuchswände (siehe Anlage 4) durchgeführt.

An den nach Süden orientierten unbewehrten Flächen dieser Wände wurden seit Juni 1988 in unregelmäßigen Abständen Permeabilitätsmessungen durchgeführt. Injektionspacker aus rostfreiem Stahl wurden einmalig so in ca. 45 mm tiefe Bohrlöcher (\varnothing 11 mm) eingesetzt, daß die durchströmte Schichtdicke genau 25 mm betrug, und verblieben zum Schutz gegen das Eindringen von Schlagregen dauernd in den Bohrlöchern.

Die Messungen wurden jeweils bei trockenem Wetter und abgetrockneter Betonoberfläche durchgeführt; vorangegangen waren teils wochenlange Trockenheitsperioden, teils Niederschläge unterschiedlicher Dauer und Intensität.

Der Zeitverlauf der aus den Meßwerten errechneten Permeabilitätskoeffizienten ist in Anlage 10 dargestellt. Der augenscheinliche Eindruck ist, daß die Permeabilitäten aller Meßstellen zwar gleichartig langsame, jahreszeitlich periodische Schwankungen mit $K_{\max}:K_{\min} \approx 2$ und überlagert einen geringfügigen zeitlinearen Anstieg zeigen, daß jedoch praktisch keine kurzfristigen Änderungen als unmittelbare Folge von Witterungseinkwirkungen zu erkennen sind.

Zur Überprüfung dieser Vermutung wurde für eine Meßstelle für den 14 Meßtermine umfassenden Zeitraum vom 29.06.1988 bis 04.01.1989 (ca. 1/2 Jahr, langsame zeitlineare Änderung von K noch vernachlässigbar) die Korrelation zwischen dem Permeabilitätskoeffizienten und verschiedenen Klimakenngrößen ermittelt. Aus den Bodenwettermeldungen des Deutschen Wetterdienstes für die - vom Standort der Versuchswände ca. 10 km entfernte - Wetterstation Braunschweig-Völkenrode wurden

- die Niederschlagshöhe,
- die Anzahl der Tage mit Niederschlagshöhen $\geq 1,0$ mm,
- die mittlere relative Luftfeuchte,
- die mittlere Sonnenscheindauer,

- vergleichsweise am stärksten mit der Permeabilität korreliert sind die Langzeit-Mittelwerte von relativer Luftfeuchte, Zahl der Regentage und Sonnenscheindauer,
- aber auch in diesen Fällen ist absolut gesehen die Korrelation mit $|r| \approx 0,7 \dots 0,75$ noch schlecht,
- der Korrelationskoeffizient zwischen Permeabilität und mittlerer Windgeschwindigkeit zeigt nicht das erwartete Vorzeichen, was darauf zurückgeführt wird, daß im hiesigen Klima Wind häufig mit Niederschlägen einhergeht.

Damit ist deutlich bestätigt, daß die integrale Permeabilität einer ca. 25 mm dicken Oberflächenschicht freibewitterter Betonbauteile von einzelnen, kurzzeitigen Klimaereignissen praktisch gar nicht beeinflusst wird. Das langfristige Klimageschehen wirkt in komplexer Weise ein, wichtige Einflußgrößen sind offenbar relative Luftfeuchte, Regenhäufigkeit, Sonnenscheindauer und Lufttemperatur, ohne daß einer dieser Einzelfaktoren dominiert. Daraus folgt, daß bei Messungen an Gebäuden auf die Witterung keine Rücksicht genommen zu werden braucht, wenn nur die Betonoberfläche kurze Zeit (z.B. über Nacht) abtrocknen konnte.

Sofern nicht der Vergleich von Bauwerksmessungen mit Labormessungen an anders gelagerten Prüfkörpern gewünscht wird, entfällt damit aber auch die Notwendigkeit, Feuchtegehalt und -profil an der Meßstelle zu ermitteln: offenbar erfährt das Feuchteprofil des Betons kurzfristige witterungsbedingte Änderungen nur in einer dünnen Oberflächenschicht, deren Einfluß gegenüber der gesamten Meßtiefe von einigen Zentimetern vernachlässigbar ist. Erforderlichenfalls kann die von Parrott und Zhang Hong /34, 35/ vorgeschlagene Messung der Ausgleichs-Luftfeuchte im Bohrloch auch bei dem hier beschriebenen Verfahren durchgeführt werden.

Es sei darauf hingewiesen, daß der jahreszeitlich periodische Verlauf der Permeabilität im Detail vom Standort eines Gebäudes, seiner Witterungsexposition und der Orientierung der Wandflächen abhängen und von dem in Anlage 10 für Südwände angegebenen Zeitverlauf abweichen kann. Entsprechende Messungen sind geplant, konnten aber im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht mehr durchgeführt werden.

5.5. Messungen an älteren Gebäuden

Durch Messungen an älteren Betonbauwerken, teils ohne, teils mit Schäden in Form abplatzender Betondeckung über korrodierten Bewehrungsstäben, sollte festgestellt werden, ob zwischen beiden Gruppen signifikante Unterschiede der Permeabilität bestehen.

Fünf sanierungsbedürftige Objekte (1 Wohngebäude, 1 Parkhaus, 3 Kirchen) konnten in der Laufzeit des Forschungsvorhabens untersucht werden, außerdem wies ein Teil des Institutsgebäudes noch nicht sanierte Schäden auf.

An schadensfreien Objekten standen - neben den o.g. Versuchswänden und anderen, deren Dauerhaftigkeit wegen des geringen Alters noch nicht beurteilt werden kann - vier Versuchshäuser auf dem Gelände des ehemaligen Laboratoriums der westfälischen Zementindustrie, jetzt ZEMLABOR, in Beckum sowie ein Teilstück einer abgebrochenen Autobahnbrücke zur Verfügung, siehe Anlage 5.

Die Permeabilitätsmessungen nach dem oben dargestellten Verfahren wurden im wesentlichen im Sommer 1989 (Beckum: Sommer 1988) durchgeführt. Pro Objekt wurden zwischen 2 und 12 Meßstellen untersucht, dabei wurden bei Gebäuden mit Schäden die Meßstellen stets in der Nähe größerer Betonabplatzungen angeordnet.

Die Einzelergebnisse (nach Gleichung 2, Abschnitt 4.6., berechneter Permeabilitätskoeffizient) sind in Anlage 11 dargestellt. Zum Vergleich wurden auch Werte einiger bewitterter Versuchswände ($w/z = 0,65$ und $0,98$) vom Sommer 1989 mit aufgenommen.

Versuchsweise wurden alle Einzelergebnisse in zwei Gruppen - Gebäude ohne bzw. mit Schäden, bei Vernachlässigung aller sonstigen Verschiedenheiten der untersuchten Objekte - zusammengefaßt und die Wahrscheinlichkeiten für die Unterschreitung eines bestimmten Permeabilitätskoeffizienten im Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen, siehe Anlage 12.

Man erkennt:

- Innerhalb jeder der beiden Gruppen sind die einzelnen Meßwerte annähernd normal verteilt, wodurch das Vorgehen nachträglich gerechtfertigt wird.
- Der Permeabilitätskoeffizient, der an 50 % aller Meßstellen nicht überschritten wird, beträgt bei schadensfreien Gebäuden ca. $2,9 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$, bei Gebäuden mit Korrosionsschäden dagegen ca. $1,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$, beide unterscheiden sich also um einen Faktor von ca. 5.
- Die Streubreite der Permeabilität an einem einzelnen Gebäude ist z.T. deutlich größer als dieser Unterschied.

Dabei ist allerdings zu beachten, daß mit Ausnahme des durch besonders hohe Permeabilitäten auffallenden Parkhauses Gifhorn (lfd. Nr. 21) die Betondeckung an allen Schadensstellen nur wenige Millimeter (immer unter 10, teilweise bis 0) betrug. Bei größerer Deckung wäre sicher in vielen Fällen eine höhere Permeabilität erforderlich gewesen, um Schäden zu verursachen, d.h. bei mangelnder Dauerhaftigkeit trotz ausreichender Betondeckung ist im Mittel ein Permeabilitätskoeffizient größer als $1,4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ zu erwarten.

Es wird die Notwendigkeit gesehen, die hier begonnenen Untersuchungen in den nächsten Jahren in möglichst großem Umfang fortzuführen, um eine breite Erfahrungsbasis über den Zusammenhang zwischen Permeabilität und Dauerhaftigkeit zu gewinnen. Allerdings ist darauf hinzuweisen, daß damit allein das Ziel einer Dauerhaftigkeitsprognose noch nicht zu erreichen ist. Die Prognose besteht in dem Schluß von der derzeitigen Permeabilität auf die Wahrscheinlichkeit eines Schadens zu einem späteren Zeitpunkt, d.h. die Messungen an geschädigtem Beton müssen noch durch Untersuchungen der langfristigen zeitlichen Änderung der Permeabilität (z.B. infolge Austrocknung und Karbonatisierung) ergänzt werden.

6. Begleitende Untersuchungen

6.1. Zusammenhang zwischen Permeabilität und Karbonatisierungstiefe

An mehreren der untersuchten Objekte wurde auch die Karbonatisierungstiefe gemessen, teils näherungsweise an in die Oberfläche gestemmen Vertiefungen, teils an aufgespaltenen Bohrkernen, an den Permeabilitätsmeßstellen selbst oder in deren Nähe.

Die Ergebnisse sind in Anlage 13 zusammen mit den Permeabilitätskoeffizienten wiedergegeben. Da das Alter der untersuchten Objekte zwischen 3 und 38 Jahre betrug, wurden zur besseren Vergleichbarkeit die gemessenen Karbonatisierungstiefen mit dem Ansatz $t_c \sim \sqrt{\text{Zeit}}$ auf ein einheitliches Alter von 25 Jahren umgerechnet. Da diese Zeitabhängigkeit bekanntermaßen nur näherungsweise gilt, muß insbesondere bei dem jüngsten Gebäude (Alter 3 Jahre) mit einem deutlichen Fehler dieser extrapolierten Karbonatisierungstiefe gerechnet werden.

In Anlage 14 sind die auf ein Betonalter von 25 Jahren normierten maximalen Karbonatisierungstiefen der mindestens 10 Jahre alten Gebäude über dem Permeabilitätskoeffizienten aufgetragen. Eine Korrelation ist deutlich erkennbar, wenn auch die Werte wegen der Verschiedenartigkeit der untersuchten Objekte in einem recht breiten Band streuen. Bei Aufschlüsselung z.B. nach der Zementart wäre eine Reduzierung der Bandbreite zu erwarten, entsprechende Angaben waren aber nur in wenigen Fällen zu beschaffen.

Die auf ein Betonalter von 25 Jahren bezogene maximale Karbonatisierungstiefe ist für $K \lesssim 10^{-16} \text{ m}^2$ bis auf eine Ausnahme $\leq 16 \text{ mm}$, während Werte von 24 mm für $K \gtrsim 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ nicht mehr unterschritten werden. In annähernder Übereinstimmung mit Abschnitt 5.5. und Anlage 12 ist damit bei üblichen Betondeckungen der Grenzbereich zwischen dauerhaftem und nicht dauerhaftem Beton bei Permeabilitätskoeffizienten von einigen 10^{-16} m^2 anzusetzen.

6.2. Korrelation zwischen Permeabilitätskoeffizient und Wasseraufnahme nach British Standard 1881 (ISAT-Verfahren)

Im Zuge der beschriebenen Untersuchungen an bewitterten Versuchswänden sowie Gebäuden mit und ohne Korrosionsschäden wurden auch zahlreiche Messungen der Wasseraufnahme nach dem ISAT-Verfahren /15 - 18/ durchgeführt.

Dabei waren die Meßflächen für Gaspermeabilität und Wasseraufnahme teils dicht benachbart, teils identisch. In letzterem Falle wurde meist zuerst die Gaspermeabilität gemessen und das Bohrloch für die anschließende ISAT-Messung mit einer gefetteten Gummi-Spreizdichtung oberflächenbündig verschlossen. Verschiedentlich wurde auch zuerst die Wasseraufnahme und nach einer Abtrocknungszeit von mindestens einer Woche die Gaspermeabilität ermittelt.

Die Ergebnisse von 46 Vergleichsmessungen an identischen Meßstellen sind in Anlage 15 aufgetragen. Offensichtlich besteht weder für ein einzelnes Gebäude noch für die Gesamtheit der Werte eine Korrelation zwischen Permeabilitätskoeffizient und ISA_{10} -Wert (Wasseraufnahmegeschwindigkeit 10 Minuten nach Versuchsbeginn). Angesichts der Unterschiede zwischen beiden Meßverfahren hinsichtlich der erfaßten Schichtdicke und des Einflusses klimabedingter oberflächlicher Feuchteschwankungen des Betons ist dieses Resultat verständlich.

6.3. Quecksilber-Porosimetrie

Bei mehreren Untersuchungsobjekten war es möglich, zumindest einige der Permeabilitätsmeßstellen anschließend als Bohrkerne zu entnehmen. An dem so gewonnenen Material wurden u.a. auch Messungen der Porenradienverteilung mit Hilfe der Quecksilber-Porosimetrie durchgeführt.

An unterschiedlich großen Proben - Zylinder mit ca. 10 mm Durchmesser und bis zu 30 mm Länge sowie Scheiben mit 100 mm Durchmesser und 10 mm Dicke - und mit verschiedenen Meßgeräten konnte der Porenradienbereich von ca. 5 nm bis ca. 200 μm erfaßt werden.

Die gemessenen Gesamtporositäten und Porenradienverteilungen lassen eine durchgängige Korrelation mit den zuvor am gleichen Material ermittelten Permeabilitätskoeffizienten nicht erkennen. Beispielsweise zeigte bei den Bauwerken, die in Anlage 11 durch besonders große Permeabilitätsspannen auffallen (Wohngebäude Hannover und Parkhaus Gifhorn, laufende Nummern 20 und 21), Material aus den Meßstellen mit der jeweils größten und geringsten Permeabilität in einem Falle deutliche Unterschiede in der Radienverteilung insbesondere bei größeren Radien, im anderen Falle nicht, vergl. Anlagen 16 und 17.

Ähnlich widersprüchliche Ergebnisse wurden auch in anderen Fällen und auch bei Ausdehnung des Untersuchungsbereiches zu größeren Porenradien hin erzielt.

Der Versuch, aus den gemessenen Porenradienverteilungen - unter der sicherlich falschen Modellvorstellung eines parallelen, voll zur Durchströmung beitragenden Porenbündels - den Permeabilitätskoeffizienten zu berechnen, führt stets auf Werte, die gegenüber den gemessenen um mehrere Zehnerpotenzen, aber eben nicht um immer den selben Faktor zu groß sind.

Es ist daraus der Schluß zu ziehen, daß die mit Hilfe der Quecksilber-Porosimetrie erfaßte Porenradienverteilung von Beton - die ja ihrerseits schon, wegen der bekannten, verfahrensspezifischen Verfälschung durch Flaschenhalssporen usw., in unbekannter Weise von der realen Porenradienverteilung abweicht - keine Rückschlüsse auf die Permeabilität für Gasströmung erlaubt.

6.4. Transportwege des Gases im Beton

Durch einen einfachen Versuch sollte festgestellt werden, ob der Gas-transport vorwiegend im Zementstein oder im Grenzbereich Zuschlag-Zementstein erfolgt.

In der Mitte der Mantelfläche eines 15cm-Betonwürfels wurde ein Loch gebohrt, ein Injektionspacker eingesetzt und mit Druckgas (N_2) von 2 bar beaufschlagt. Die Austrittsstellen des Gases auf der Betonoberfläche wur-

den mittels Seifenlösung kenntlich gemacht, farbig angezeichnet und fotografiert.

Danach wurde die Betonoberfläche in Schritten von ca. 5 mm bis zu einer Gesamttiefe von ca. 25 mm abgeschliffen; nach jedem Schritt wurden wieder die Gasaustrittsstellen markiert und fotografiert.

An den vergrößerten Negativen wurde ausgezählt, wieviele Gasaustrittsstellen, bezogen auf die jeweilige Oberfläche und den 5 mm tiefer liegenden Schnitt, in unmittelbarer Nähe (< 2 mm entfernt) eines größeren Zuschlagkorns lagen. Es ergaben sich Anteile von 56 % bis 89 %, im Mittel 71 %, der Gesamtzahl der Gasaustrittsstellen.

Wenn auch bei diesem einfachen Versuch nur die Anzahl der Gasaustrittsstellen, nicht aber die - nach Augenschein z.T. sehr unterschiedlichen - Austrittsmengen bewertet wurden, kann doch geschlossen werden, daß der Gastransport im Beton zu einem wesentlichen Teil in der Grenzzone zwischen Zuschlag und Zementstein erfolgt.

6.5. Früherkennung von Korrosionstreibrissen

Es wurde als möglich angesehen, daß der Spannungszustand im Beton, der bei der mit Volumenzunahme einhergehenden Korrosion von Bewehrungsstählen entsteht, schon frühzeitig durch Ribbildung zu einer Erhöhung der Permeabilität des den Stahl umgebenden Betons führt.

Im günstigsten Fall würden vergleichende Permeabilitätsmessungen die Möglichkeit eröffnen, beginnender Stahlkorrosion noch vor dem Absprengen der Betondeckung durch geeignete Sanierungsmaßnahmen (Realkalisierung, diffusionsbremsende Beschichtungen) entgegenzuwirken.

Zur Überprüfung dieser Vermutungen wurden mehrere prismatische Probekörper mit Grundfläche 20 cm x 20 cm und Höhe 9 cm hergestellt, die je einen einbetonierten Bewehrungsstahl BSt 500 S, \varnothing 8 mm, mit 3 cm Deckung erhielten. Die Lagerung erfolgte 10 Tage unter feuchten Tüchern, danach im Labor.

Im Alter von etwa 10 Monaten wurde der erste Prüfling zur Permeabilitätsmessung vorbereitet. Dabei wurde das ca. 45 mm tiefe Bohrloch berührend direkt neben den Bewehrungsstahl gesetzt und eine durchströmte Schichtdicke von ca. 25 mm eingestellt.

Nach Messung der Anfangspermeabilität wurde der Prüfling mit seiner Unterseite ca. 10 mm tief in 1-molare NaCl-Lösung eingestellt. Ein in ca. 10 mm Abstand zur Unterseite in die Salzlösung eingetauchtes Edelstahlblech wurde als Kathode, der Bewehrungsstahl als Anode mit einer 110V-Gleichspannungsquelle verbunden, der fließende Strom wurde gemessen. In regelmäßigen Zeitabständen von 10 Minuten wurden Permeabilitätsmessungen durchgeführt.

Nach ca. 4 h 40' und einer transportierten Ladungsmenge von 0,46 Ah wurde an einer Kante des Prüflings, über der Austrittsstelle des Bewehrungsstabes, der erste Riß entdeckt. Nach 5 h 30' und einer Ladungsmenge von 0,83 Ah hatte der Riß nach Augenschein den Rand des Gassammlers erreicht. Bis dahin konnte keine signifikante Zunahme des austretenden Gasstromes festgestellt werden. Erst danach begann der Gasstrom langsam geringfügig zuzunehmen (nach 6 h und 1,1 Ah Zunahme um 40 %, danach Versuch abgebrochen).

In einem zweiten Versuch wurde ein ovaler Deckel (100 mm lang, 50 mm breit) über dem Bewehrungsstahl auf der Betonoberfläche dicht befestigt. Als Maß für die Dichtigkeit der Betonoberfläche wurde die Druckabfallsgeschwindigkeit nach Aufbringen eines Überdruckes von ca. 10 mm Wassersäule innerhalb des Deckels gemessen, d.h. es erfolgte eine Unterströmung des Deckelrandes und nicht, wie im ersten Versuch, eine Durchströmung der Betondeckschicht. Auch hier wurde ein nennenswert schnellerer Druckanstieg erst festgestellt, nachdem ein deutlich sichtbarer Riß von ca. 0,05 mm Weite den Deckelrand erreicht hatte.

Aus beiden Versuchen folgt, daß das beschriebene Meßverfahren nicht in der Lage ist, die Korrosion eines Bewehrungsstahles vor der mit bloßem Auge sichtbaren Ribbildung im Beton nachzuweisen.

7. Zusammenfassung

Es wurde ein neues baustellengeeignetes Verfahren zur Messung der Gaspermeabilität oberflächennaher Betonschichten entwickelt und im praktischen Einsatz erprobt.

Ähnlich wie bei dem bekannten Verfahren von Figg dient der Strömungswiderstand zwischen dem unteren Teil eines oben abgedichteten Bohrlochs und der umgebenden Betonoberfläche als Meßgröße. Im Unterschied zu Figg wird allerdings bei stationären Druck- und Strömungsverhältnissen, bei Strömungsrichtung vom Bohrloch zur Betonoberfläche und durch Erfassung des auf der Oberfläche mit Atmosphärendruck austretenden Gasstromes gemessen.

Der Einfluß der wichtigsten Verfahrensparameter (Abmessungen von Bohrloch und Gassammler, Gasdruck, durchströmte Schichtdicke) wurde untersucht. Für einige Parameter wurde daraufhin eine feste Wahl getroffen, für andere werden Umrechnungsformeln angegeben. Insbesondere kann die Dicke der durchströmten Oberflächenschicht an die jeweiligen Erfordernisse (z.B. Betondeckung) angepaßt werden. Durch Vergleichsmessungen mit einem Laborverfahren wurde eine Kalibrierung gewonnen, die die Umrechnung der Meßergebnisse in den Permeabilitätskoeffizienten (Einheit m^2) erlaubt.

Die werkstoffbedingten örtlichen Streuungen der Permeabilität sind i.a. recht groß. Statistische Überlegungen zeigen jedoch, daß eine grobe Klassifizierung der Dichtigkeit (z.B. ausreichend/fraglich/nicht ausreichend) auch mit stichprobenartigen Untersuchungen (5...10 Einzelmessungen) durchaus möglich ist.

Die Permeabilität bewitterter Betonoberflächen zeigt zwar regelmäßige Veränderungen im Jahresrhythmus, der kurzzeitige Witterungseinfluß ist jedoch vernachlässigbar gering. Das deutet darauf hin, daß der Feuchtegehalt des Betons über den weitaus größten Teil der durchströmten Schichtdicke zeitlich konstant ist. Begleitende Feuchtegehaltsmessungen werden daher allenfalls für den Vergleich mit Labormessungen, nicht jedoch für die bauwerksbezogene Beurteilung der Betonqualität für erforderlich gehalten.

Bei Untersuchungen älterer Gebäude ohne und mit Schäden durch Bewehrungskorrosion unterschieden sich die mittleren Permeabilitätskoeffizienten beider Gruppen um den Faktor 5, allerdings bei beträchtlicher Überlappung der beiden Wertebereiche. Die Meßwerte der Karbonatisierungstiefe zeigen bei Berücksichtigung des unterschiedlichen Betonalters einen deutlichen Zusammenhang mit dem Permeabilitätskoeffizienten, der für $K \gtrsim 10^{-16} \text{ m}^2$ und übliche Werte der Betondeckung Korrosionsschäden innerhalb der Gebäudenutzungsdauer erwarten läßt.

Die allgemeine Vermutung, daß neben dem Diffusionswiderstand des Betons - der im Labor mit einigem Aufwand, an Ort und Stelle praktisch nicht zu bestimmen ist - auch seine Gaspermeabilität als Dauerhaftigkeitskriterium geeignet ist, wird durch die bisherigen Untersuchungen gestützt. Im Hinblick auf eine möglichst frühzeitige Beurteilung von Betonbauwerken werden eine genauere Eingrenzung des Zusammenhanges zwischen Permeabilität und Karbonatisierungstiefe sowie Untersuchungen über die zeitliche Veränderung der Permeabilität relativ jungen Betons für erforderlich gehalten.

LITERATURVERZEICHNIS

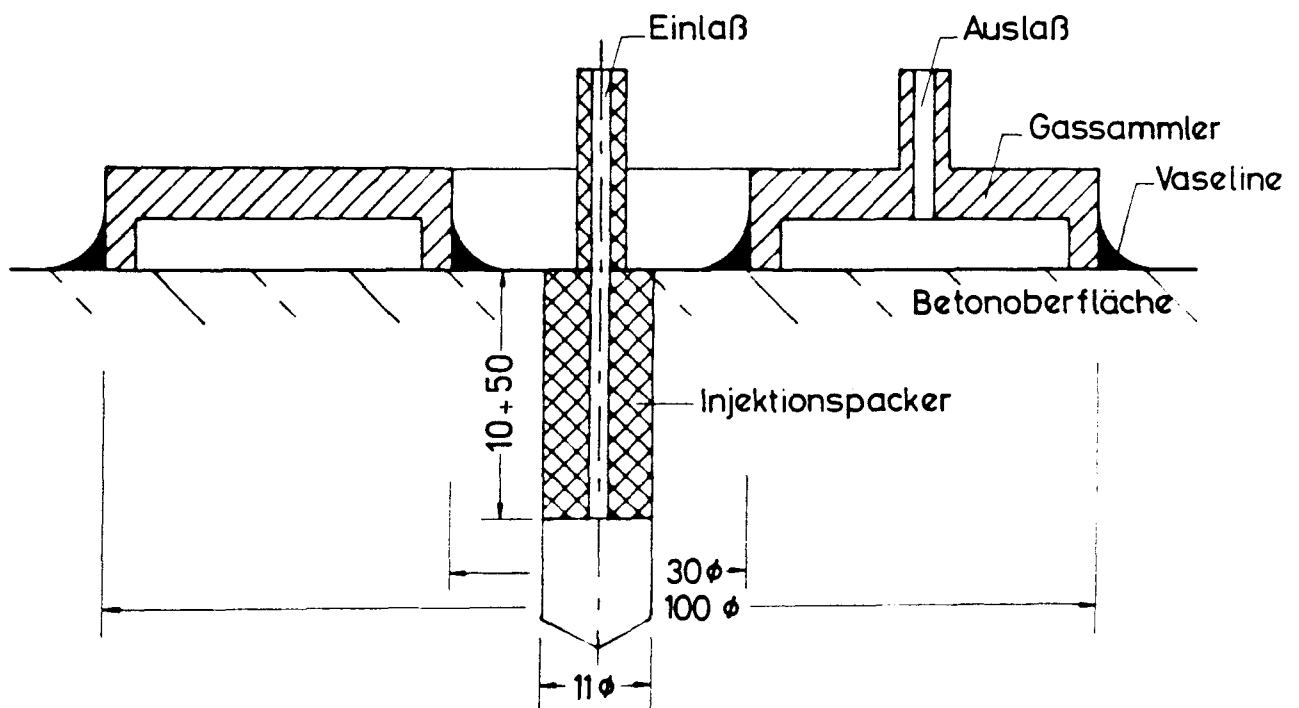
- /1/ Cammerer, W. F.:
Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern
VDI-Forschungsheft 500 (1963)
- /2/ Gertis, K.; Werner, H.:
Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen
in: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen
Schriftenreihe des DAfStb, Heft 258 (1976), S. 5-35
- /3/ Wolfseher, U.; Gertis, K.:
Isothermer Gastransport in porösen Stoffen aus gaskinetischer Sicht
in: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen
Schriftenreihe des DAfStb, Heft 258 (1976), S.37-62
- /4/ Stamm, K. H. D.:
Modell zur quantitativen Erfassung der physikalischen Vorgänge bei
der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in Bauteilen
Dissertation TH Aachen (1979)
- /5/ Lawrence, C. D.:
Durability of concrete: molecular transport process and test methods
Cement and Concrete Association, Technical Report 544 (1981)
- /6/ Powers, T. C.; Copeland, L. E.; Hayes, J. C.; Mann, H. M.:
Permeability of Portland Cement Paste
Proc. ACI 51 (1954) S. 285-298
- /7/ Chen, L. C.; Katz, D. L.:
Diffusion of Methane Through Concrete
ACI Journal (1978), S. 673-679
- /8/ Nyame, B. K.; Illston, J. M.:
Relationship between permeability and pore structure of hardened
cement paste
Mag. of Concrete Res. 33 (1981) No. 116, S. 139-146
- /9/ Hurling, H.; Wierig, H. J.:
Untersuchung zur Sauerstoffdiffusion durch die Betondeckung der
Bewehrung von Stahlbetonbauten
Kurzberichte aus der Bauforschung (April 1988), Bericht Nr. 63
Forschungsbericht Inst. für Baustoffkunde und Materialprüfung,
TU Hannover (1985)
- /10/ Lawrence, C. D.:
Transport of Oxygen through Concrete
The British Ceramic Society Meeting "Chemistry and Chemically-
Related Properties of Cement", Imperial College, London 1984
- /11/ Grube, H.; Lawrence, C. D.:
Permeability of Concrete to Oxygen
RILEM-Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal
Outdoor Exposure, Hannover 1984, Proceedings S. 68-79

- /12/ Gräf, H.; Grube, H.:
Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton
gegenüber Gasen und Wasser
beton 36 (1986) H.5, S. 184-187; H.6, S. 222-226
- /13/ Gräf, H.; Grube, H.:
Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf
seine Gasdurchlässigkeit
beton 36 (1986) H. 11, S. 426-429, H. 12, S. 473-476
- /14/ Gaber, K.:
Influence of mix proportions and components on the diffusion
coefficient and the permeability of concrete
Darmstadt Concrete 3 (1988), S. 39-48
- /15/ Levitt, M.:
Non-destructive testing of concrete by the initial surface
absorption method
Proc. of the Symposium on Non-destructive testing of concrete and
timber, London, 11-12 June 1969
Inst. of Civil Engineers, 1970, S.23-28
- /16/ Levitt, M.:
An assessment of the durability of concrete by ISAT
Proc. of RILEM Symposium on Durability of concrete, Prague 1969
- /17/ Levitt, M.:
The ISAT - A Non-Destructive Test for the Durability of Concrete
British Journal of N.D.T., July 1971, S. 106-112
- /18/ British Standards Institution:
BS 1881, Methods of testing concrete, Part 5 (1970)
- /19/ Karsten, R.:
Bauchemie für Schule und Baupraxis
Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft m. b. H.,
Heidelberg 1960, S. 381-382
- /20/ Montgomery, F. R.; Adams, A.:
Early experience with a new concrete permeability apparatus
Proc. of second Int. Conf. on structural faults and repair,
London, 30 April-2 May 1985,
Edinburgh, Engineering Technics Press, 1985, S. 359-363
- /21/ Montgomery, F. R.:
Concrete surface permeability
Cement and Concrete Association
Research Seminar 30 June - 2 July 1986
- /22/ Germanns Waterpermeability Test
Germann Instruments A/S
Copenhagen, Denmark

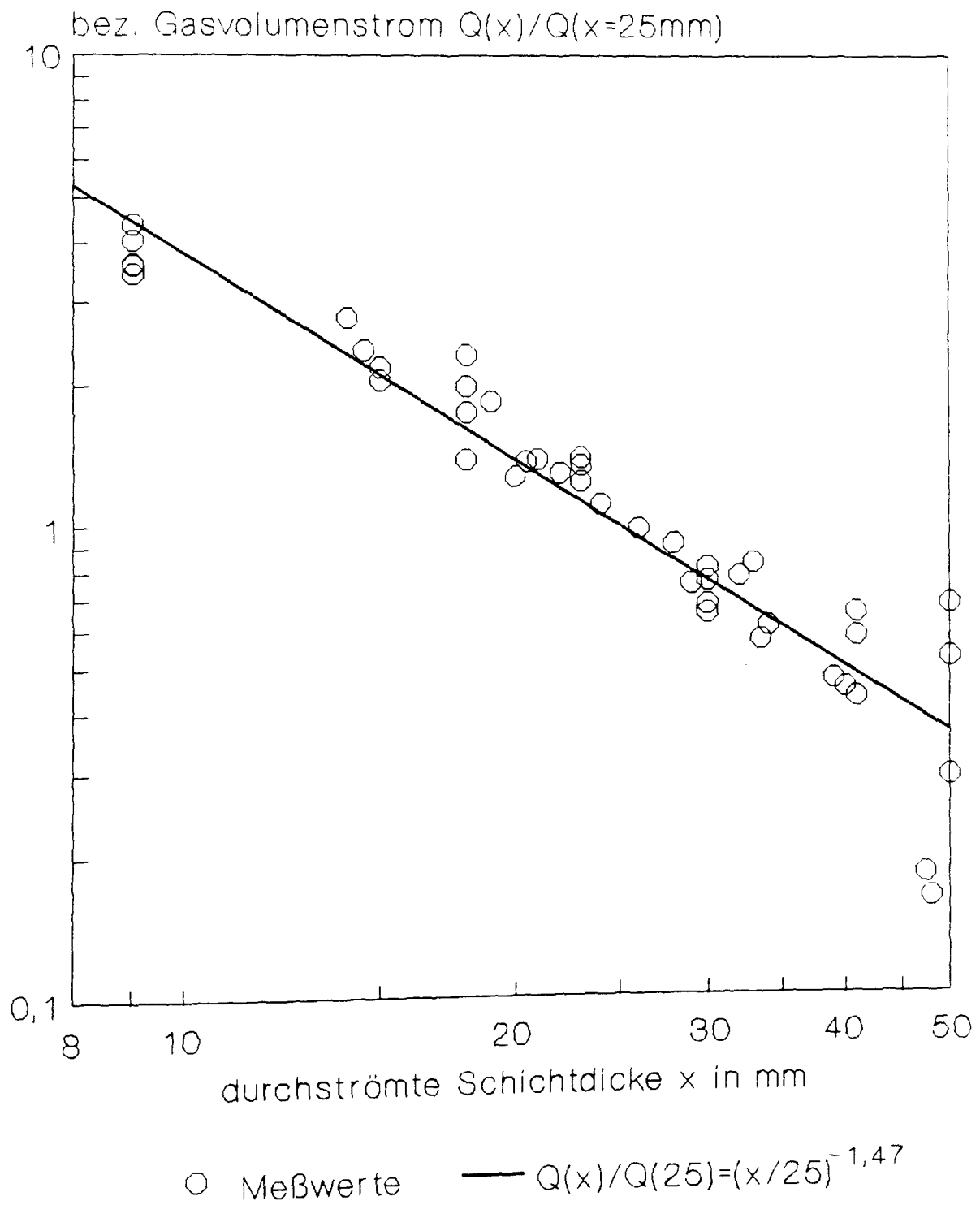
- /23/ Steinert, J.:
Zerstörungsfreie Ermittlung der Wassereindringtiefe in Kiesbeton am Bauwerk
Forschungsbeiträge für die Baupraxis (1979), S. 151-162
- /24/ Schönlin, K.; Hilsdorf, H.:
Evaluation of the Effectiveness of Curing of Concrete Structures
in: Scanlon, J.M. (Ed.):
Concrete Durability
Katharine and Bryant Mather International Conference
ACI Publication SP-100, 1987, S. 207 - 226
- /25/ Schönlin, K. F.:
Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton
Dissertation Universität Karlsruhe 1989
Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Univ. Karlsruhe 1989
- /26/ Form + Test Seidner
Postfach 1154
D - 7940 Riedlingen
- /27/ Figg, J. W.:
Methods of measuring the air and water permeability of concrete
Mag. of Concrete Res. 25 (1973), No. 85, S. 213-219
- /28/ Pihlajavaara, S. E.; Paroll, H.:
On the correlation between permeability properties and strength of concrete
Cement and Concrete Research Vol. 5 (1975), S.321-328
- /29/ Cather, R.; Figg, J. W.; Marsden, A. F.; O'Brien, T. P.:
Improvements to the Figg metod for determining the air permeability of concrete
Mag. of Concrete Res. 36 (1984), No. 129, S. 241-245
- /30/ Richards, P. W.:
A laboratory investigation of the water permeability and crushing strength of concrete made with and without pulverised fuel ash, as affected by early curing temperature
Cement and Concrete Association (1982)
Advanced Concrete Technology Project 82/9
- /31/ Dhir, R. K.; Hewlett, P. C.; Chan, Y. N.:
Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods
Mag. of Concrete Res. 39 (1987) No. 141, S 183-195
- /32/ Reinhardt, H. W.; Mijnsbergen, J.; Croes, J. H.:
Naar een praktische Meetmethode voor de Kwaliteit van de Betondekking
Cement 1988 nr. 1, S 22-26

- /33/ Reinhardt, H. W.; Mijnsbergen, J. P. G.:
In-situ measurement of permeability of concrete cover by overpressure
in: Armer, G. S. T.; Clarke, J. L.; Garas, F. K. (Ed.):
The Life of Structures - Physical Testing
Butterworths 1989, S. 243-254
- /34/ Parrott, L.; Chen Zhang Hong:
Some aspects influencing air permeation measurements in cover concrete
(wird noch veröffentlicht)
- /35/ Chen Zhang Hong; Parrott, L. J.:
Air permeability of cover concrete and the effect of curing
British Cement Association Report C/5, Oct. 1989
- /36/ Hansen, A. J.; Ottosen, N. S.; Petersen, C. G.:
Gas-Permeability of Concrete In Situ: Theory and Practice
in: Malhotra, V. M. (Ed.):
In Situ / Nondestructive Testing of Concrete
ACI Publication SP-82, 1984, S. 543 - 556
- /37/ Tanahashi, I.; Ohgishi, S.; Ono, H.; Mizutani, K.:
Evaluation of Durability for Concrete in Terms of Watertightness by "Permeability Coefficient Test Results"
in: Scanlon, J.M. (Ed.):
Concrete Durability
Katharine and Bryant Mather International Conference
ACI Publication SP-100, 1987, S. 187 - 206
- /38/ Hall, C.:
Water Movement in Porous Building Materials -
IV. The Initial Surface Absorption and the Sorptivity
Building and Environment Vol 16, No. 3 (1981), S. 201-207
- /39/ Callow, D. P.:
An investigation into possible improvements to the ISAT for site testing
Brunel University, 1983. Degree Project, Materials Science and Technology, 1982/83
- /40/ Kasai, Y.; Matsui, I.; Kamohara, H.:
Method of rapid test for air permeability of structural concrete
Transactions Japan Concrete Institute Vol. 5 (1983), S.97-104
- /41/ Kasai, Y.; Matsui, I.; Nagano, M.:
On Site Rapid Air Permeability Test for Concrete
in: Malhotra, V. M. (Ed.):
In Situ / Nondestructive Testing of Concrete
ACI Publication SP-82, 1984, S. 525 - 541
- /42/ Concrete Society:
Permeability testing of site concrete - a review of methods and experience
Permeability of concrete and its control - Papers for a one-day Conference, London, 12 Dec 1985, S. 1-68

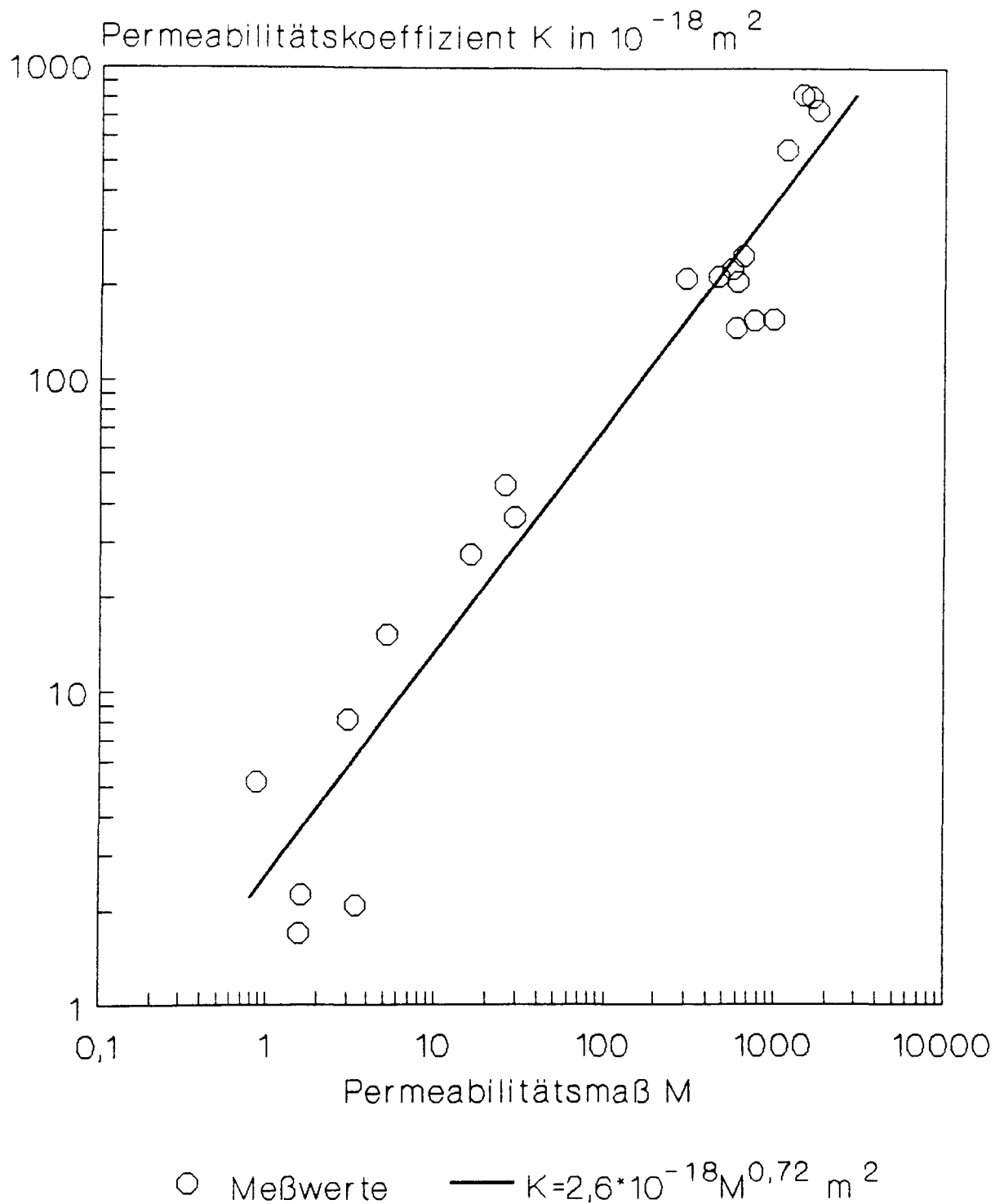
- /43/ Jönis, P. J.; Molin, C.:
Mätning av betongens luftpermeabilitet
Laboratoriestudie av en fältmässig metod
SP Rapport 1988:43, Byggnadsteknik, Stockholm
- /44/ Bunte, D.; Rostásy, F. S.:
Test Methods for On-site Assessment of Durability
IABSE Symposium Lissabon 1989
IABSE Reports Vol. 57/1, S. 335-340
- /45/ Hilsdorf, H. K.:
Durability of Concrete - a Measurable Quantity?
IABSE Symposium Lissabon 1989
IABSE Reports Vol. 57/1, S. 111-123
- /46/ Montgomery, F. R.; Long, A. E.; Basheer, P. A. M.:
Assessing Surface Properties of Concrete by In-situ Measurements
IABSE Symposium Lissabon 1989
IABSE Reports Vol. 57/1, S. 871-876
- /47/ Parrott, L. J.:
Assessing carbonation in concrete structures
(wird noch veröffentlicht)
- /48/ Sachs, L.:
Statistische Methoden
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1972)
- /49/ Becker, R.:
Theorie der Wärme
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1966)



Anlage 1: Anordnung zur Messung der Permeabilität oberflächennaher Betonschichten am Bauwerk



Anlage 2: Permeabilitätsmessungen nach dem Bauwerksverfahren:
 Abhängigkeit des vom Sammler aufgefangenen Gasvolumenstromes
 von der durchströmten Schichtdicke



Anlage 3: Permeabilitätsmessungen nach dem Bauwerksverfahren:
Zusammenhang zwischen Permeabilitätsmaß M und Permeabilitäts-
koeffizient K in m^2

Versuchswände und -würfel								
laufende Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
w/z-Wert [-]	0,50		0,67		0,85		0,98	
Zementgehalt [kg/m ³]	330		290		230		215	
Zuschlaggehalt [kg/m ³]	1920		1810		1860 ¹⁾		1850 ²⁾	
Nachbehandlung ³⁾	A	B	A	B	A	B	A	B
Betonierdatum (1987)	27.07.	10.08.	19.08.	02.09.	14.09.	28.09.	23.11.	16.12.
Nicht variierte Parameter	Zementart: PZ 35 F Sieblinie: B/C 32 Konsistenz: K2 (a ≈ 40 cm) Verdichtung: Innen- und Schalungsrüttler (zugehörige Würfel nur Innenrüttler)							

1) einschließlich 60 kg/m³ Kalksteinmehl

2) einschließlich 90 kg/m³ Kalksteinmehl

3) Nachbehandlung A: 1 Tag in Schalung,
27 Tage witterungsgeschützt in Versuchshalle,
danach Aufstellung im Freien

Nachbehandlung B: 1 Tag in Schalung,
6 Tage unter feuchten Tüchern und Folie,
danach Aufstellung im Freien

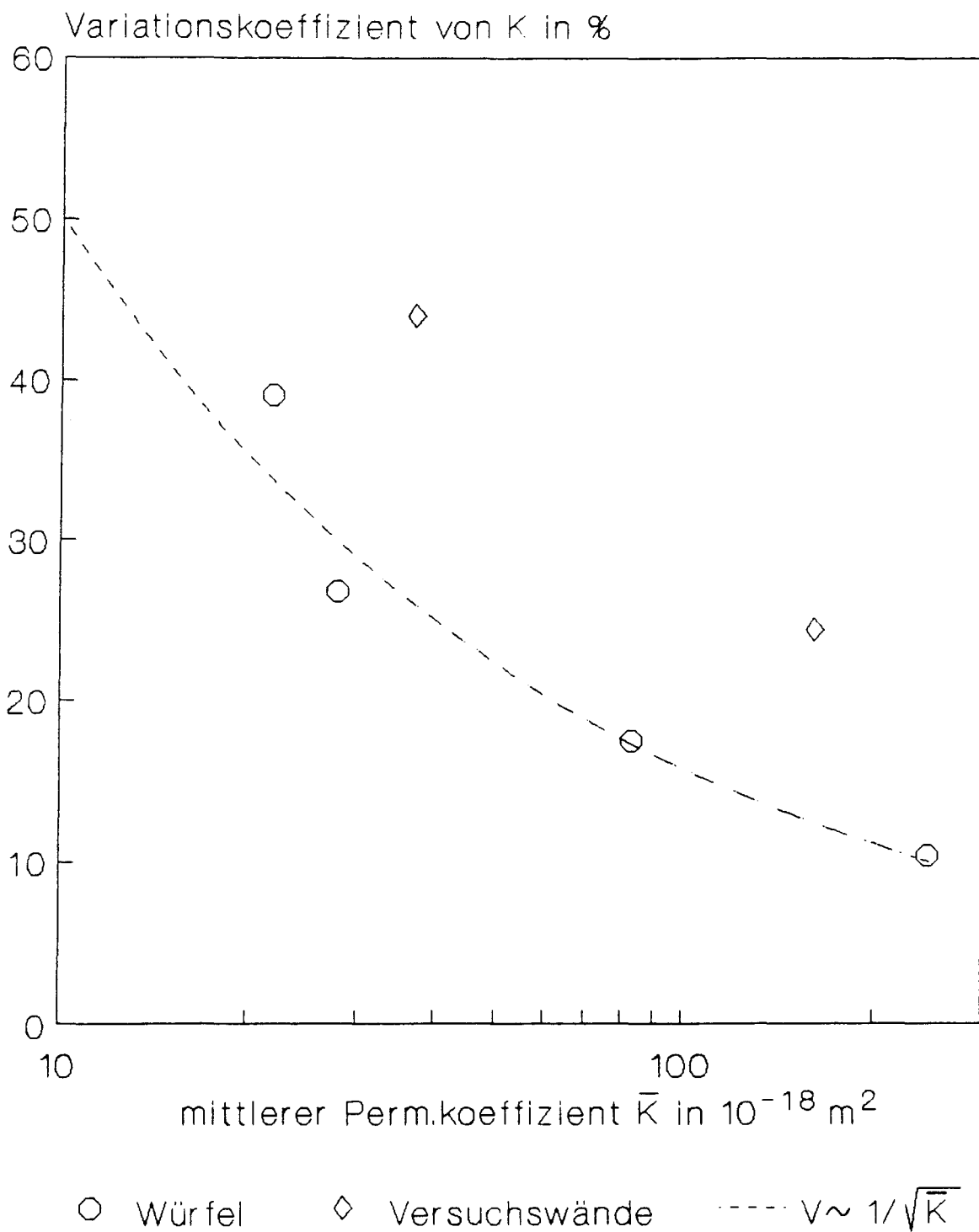
Anlage 4: Übersicht über die Versuchswände und -würfel

Gebäude ohne Schäden								
laufende Nummer	9	10	11	12	13	14	15	
Gebäudeart	BAB-Brücke	Versuchshäuser					Silo	Klär-anlage
Standort	BS	Beckum					AB	BS
Baujahr	1951	1963	1963	1963	1964	1986	1989	
Zementart	PZ 325	PZ 275	HOZ 275	HOZ 375	HOZ 275	*	HOZ35L	
Betongüte	B 450	*	*	*	*	*	B 35	
Meßstellen:								
Orientierung	W, 0	W,N,0	innen	W,N,0	W, 0	W,N,0	innen	W, S
Betondeckung [mm]	*	*	*	*	*	*	*	45
Karbonatisierungstiefe [mm]	≤ 1	≤ 3	≤ 12	≤ 13	≤ 12	≤ 19	≤ 19	~ 0

Gebäude mit Korrosionsschäden						
laufende Nummer	16	17	18	19	20	21
Gebäudeart	Kirche	Inst.	Kirche	Kirche	Wohn-gebäude	Park-haus
Standort	SZ	BS	BS	BS	H	GF
Baujahr	1953	1963	1964	1969	1972	1979
Zementart	*	PZ	*	*	*	*
Betongüte	*	*	B 25	*	*	*
Meßstellen:						
Orientierung	N	N, 0	alle	S	N, S	alle
Betondeckung [mm]	0 - 3	0 - 5	0 - 5	5 - 7	0 - 10	≥ 16
Karbonatisierungstiefe [mm]	*	≤ 20	≤ 10	*	≤ 20	≤ 23

*) Wert nicht bekannt

Anlage 5: Übersicht über die Gebäude, die für Permeabilitätsmessungen zur Verfügung standen



Anlage 6: Örtliche Streuung der Permeabilität bei Messung an dicht benachbarten Stellen:
Abhängigkeit des Variationskoeffizienten vom Mittelwert des Permeabilitätskoeffizienten

Anlage 7: Statistische Herleitung: Örtliche Streuungen der Permeabilität

Als Modell für die permeable Oberflächenschicht eines ausgedehnten Betonbauteils soll eine dünne Platte der Fläche A betrachtet werden, die bis auf N zufällig verteilte, durchgehende, nicht untereinander verbundene Poren völlig dicht ist.

Innerhalb der Gesamtfläche A werde eine sehr viel kleinere Fläche a abgegrenzt (Meßfläche für Permeabilitätsmessung). Mit den Bezeichnungen

$$a/A = p \quad (p \ll 1), \quad 1 - p = q$$

sind p bzw. q die Wahrscheinlichkeiten dafür, eine bestimmte der (zunächst durchgehend numeriert und nicht vertauschbar gedachten) insgesamt N Poren innerhalb bzw. außerhalb der Fläche a zu finden.

Die Wahrscheinlichkeit, alle Poren mit Nummern 1...n innerhalb und alle Poren mit Nummern n+1...N außerhalb von a zu finden, ergibt sich als Produkt aller Einzelwahrscheinlichkeiten zu

$$p^n \cdot q^{N-n}.$$

Wird die Unterscheidbarkeit der Poren aufgegeben, so ist dieser Ausdruck zu multiplizieren mit

$$\frac{N!}{n!(N-n)!},$$

das ist die Anzahl der Möglichkeiten, den betrachteten Zustand - n Poren innerhalb von a, N-n Poren außerhalb - zu realisieren.

Die Wahrscheinlichkeit, genau n Poren innerhalb der Meßfläche a zu finden, ist also

$$w(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n q^{N-n}$$

Es gilt $\sum w(n) = 1$ (Summation hier und im folgenden immer über $n = 0 \dots N$), denn

$$\sum w(n) = \sum \frac{N!}{n!(N-n)!} \cdot p^n \cdot q^{N-n} = (p + q)^N.$$

Ersichtlich ist

$$p \cdot \frac{\partial w(n)}{\partial p} = n \cdot w(n);$$

zweimalige Anwendung auf die vorige Gleichung liefert

$$\sum n w(n) = N p (p + q)^{N-1} \text{ und}$$

$$\sum n^2 w(n) = N p (p + q)^{N-1} + N(N-1) p^2 (p + q)^{N-2}$$

Anlage 7 - Blatt 2

Bei Ausnützung von $p + q = 1$ und Einführung der abkürzenden Schreibweise für Mittelwerte ergibt sich

$$\bar{n} = Np, \quad \overline{n^2} = Np + N^2p^2 - Np^2$$

Die Varianz s^2 ist definiert als $s^2 = \overline{n^2} - \bar{n}^2$, also ist

$$s^2 = Np - Np^2 = \bar{n} - p \cdot \bar{n},$$

d.h. für $p \ll 1$ (wie vorausgesetzt) wird

$$s^2 \approx \bar{n}, \quad s \approx \sqrt{\bar{n}}$$

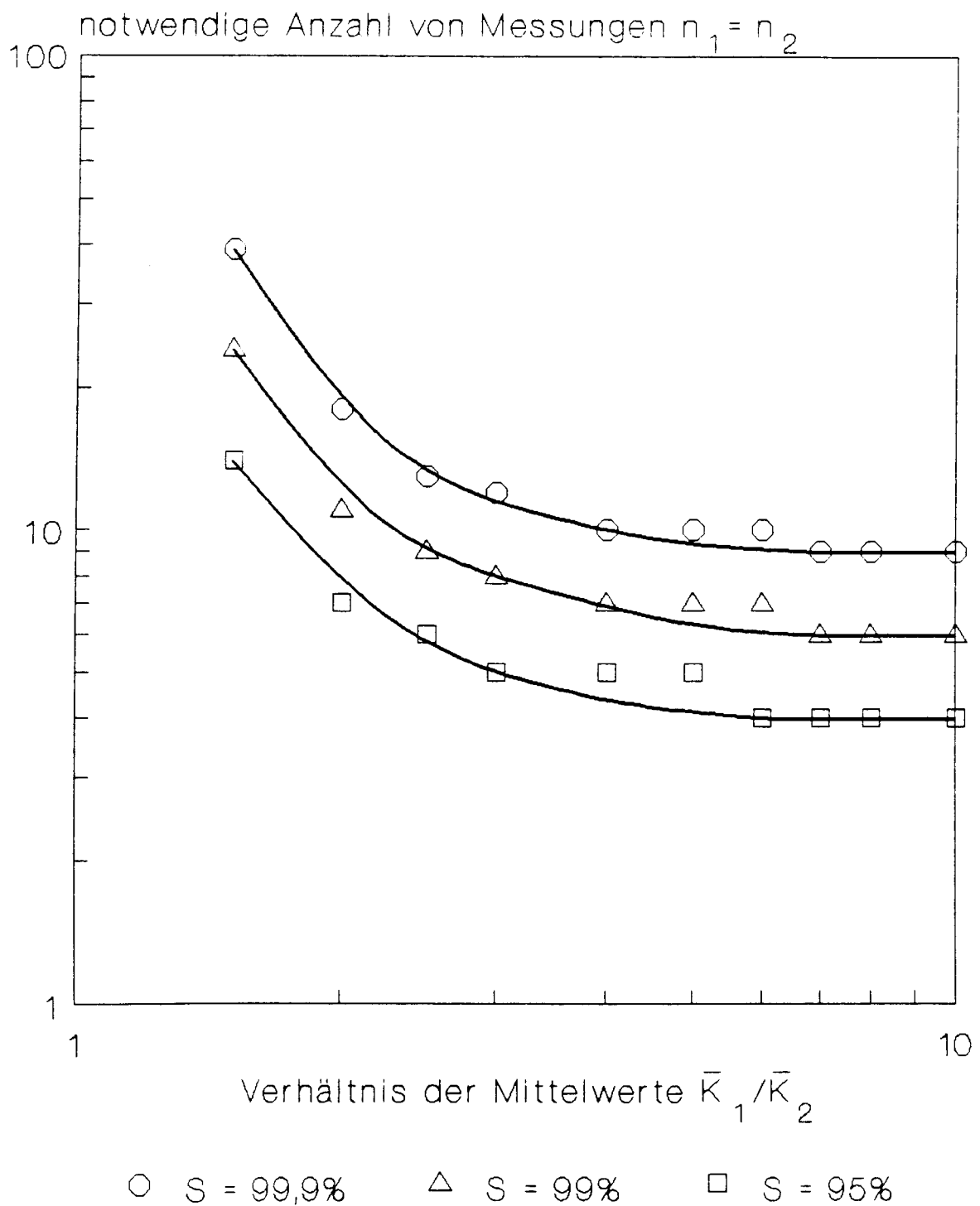
und der Variationskoeffizient

$$V = \frac{s}{\bar{n}} \approx \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}.$$

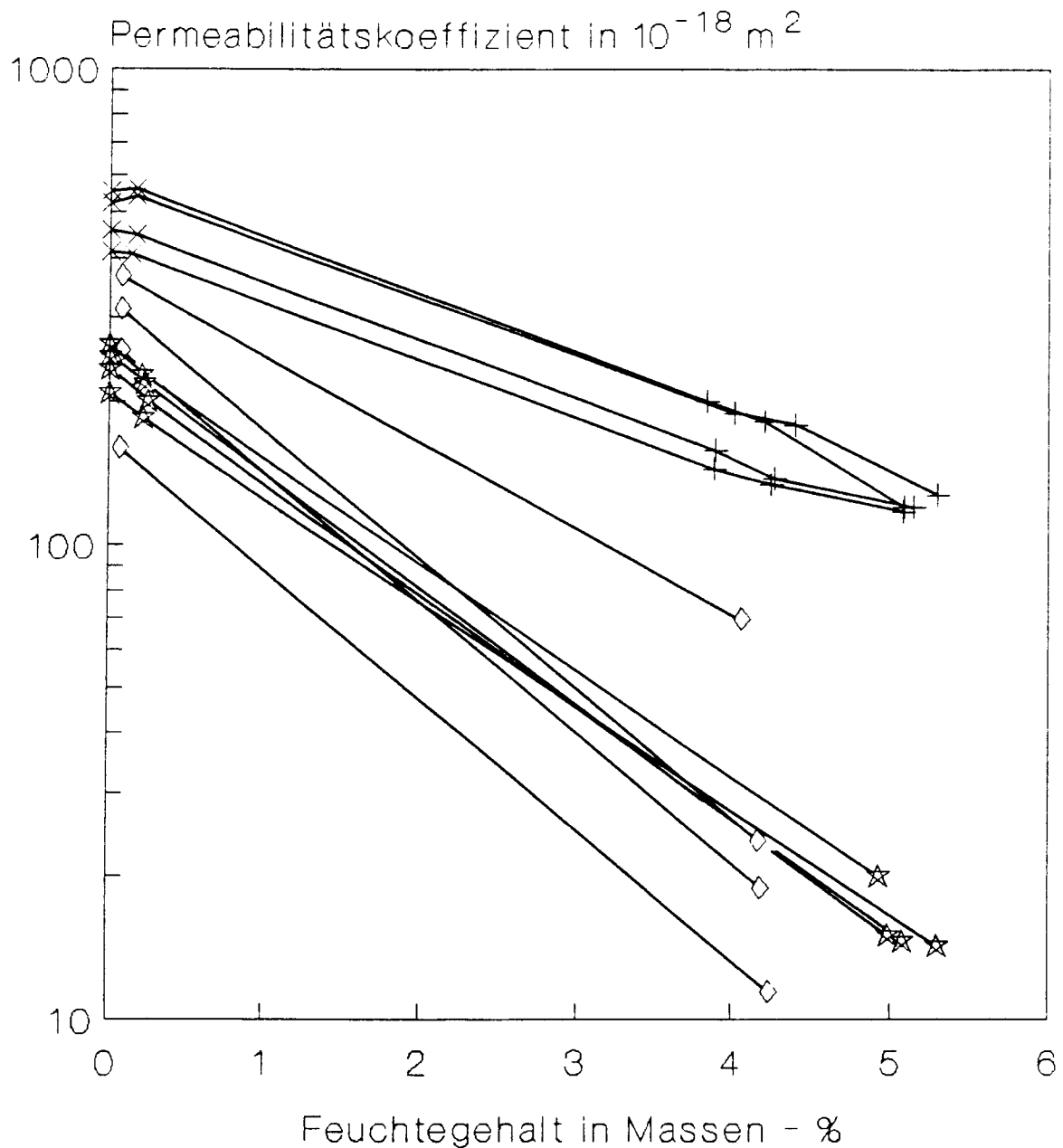
Da in dem gewählten Modell der Meßwert des Permeabilitätskoeffizienten K proportional zu der Anzahl n der innerhalb der Meßfläche a befindlichen Poren ist, folgt direkt

$$V_K \sim \frac{1}{\sqrt{K}}$$

(nach /49/, § 23).

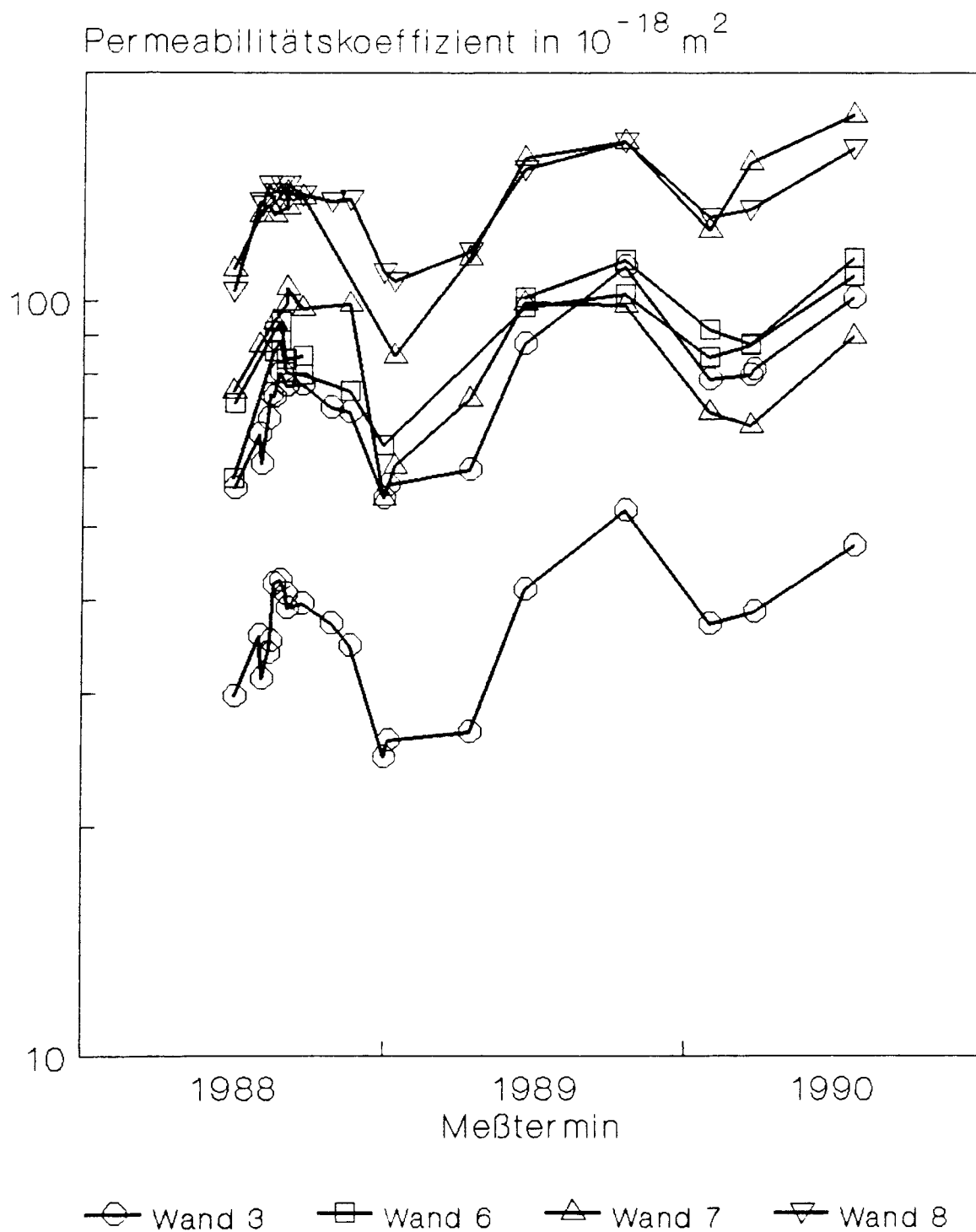


Anlage 8: Anzahl $n_1 = n_2$ der Messungen, die erforderlich sind, um zwei Betone mit unterschiedlichen mittleren Permeabilitätskoeffizienten $\bar{K}_1 \neq \bar{K}_2$ und gleichen Variationskoeffizienten von 50 % mit einer vorgegebenen statistischen Sicherheit S als unterschiedlich zu erkennen.

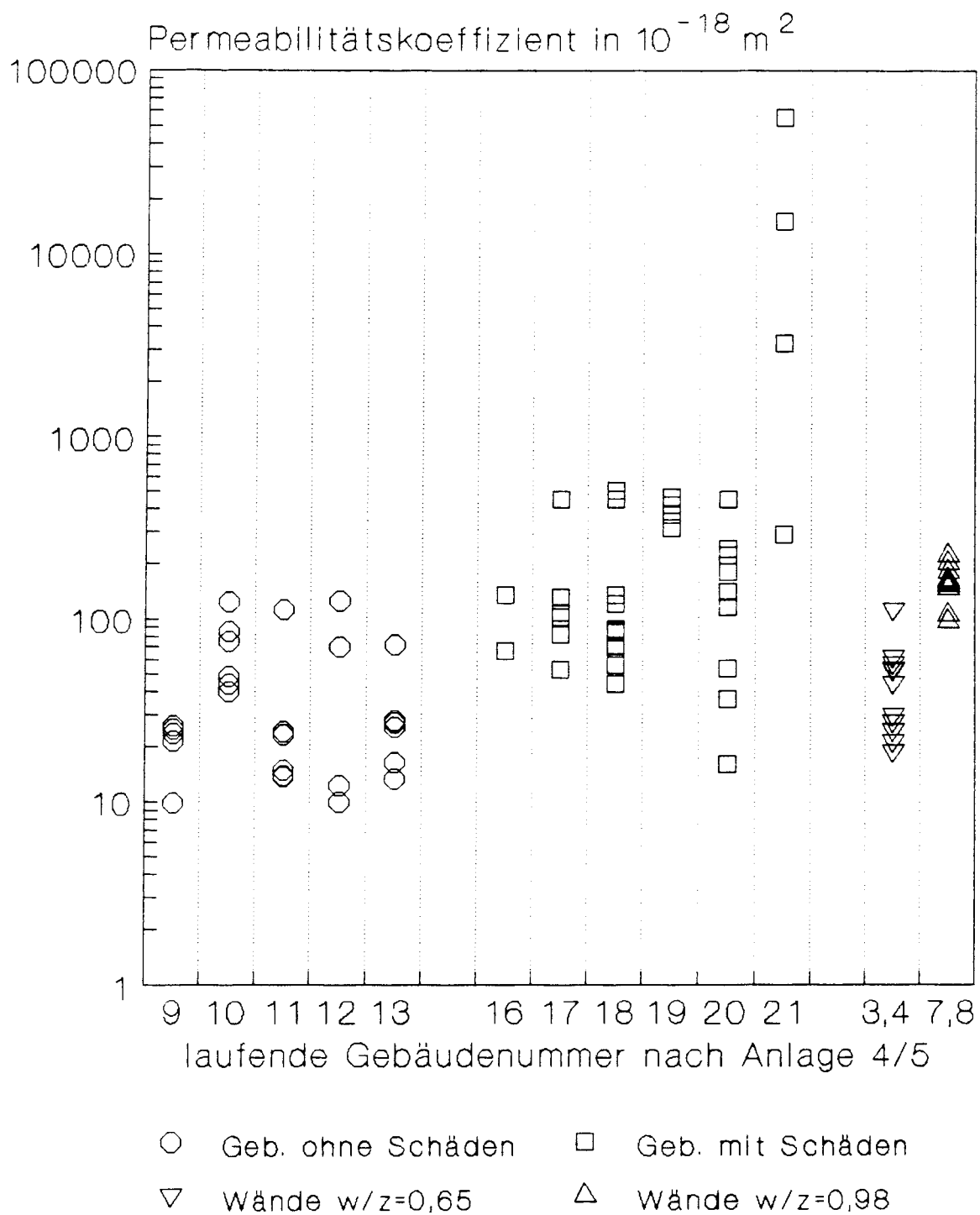


◇	Würfel 1, 105°C	☆	Würfel 3, 105°C
+	Würfel 7, 20°C	×	Würfel 7, 105°C

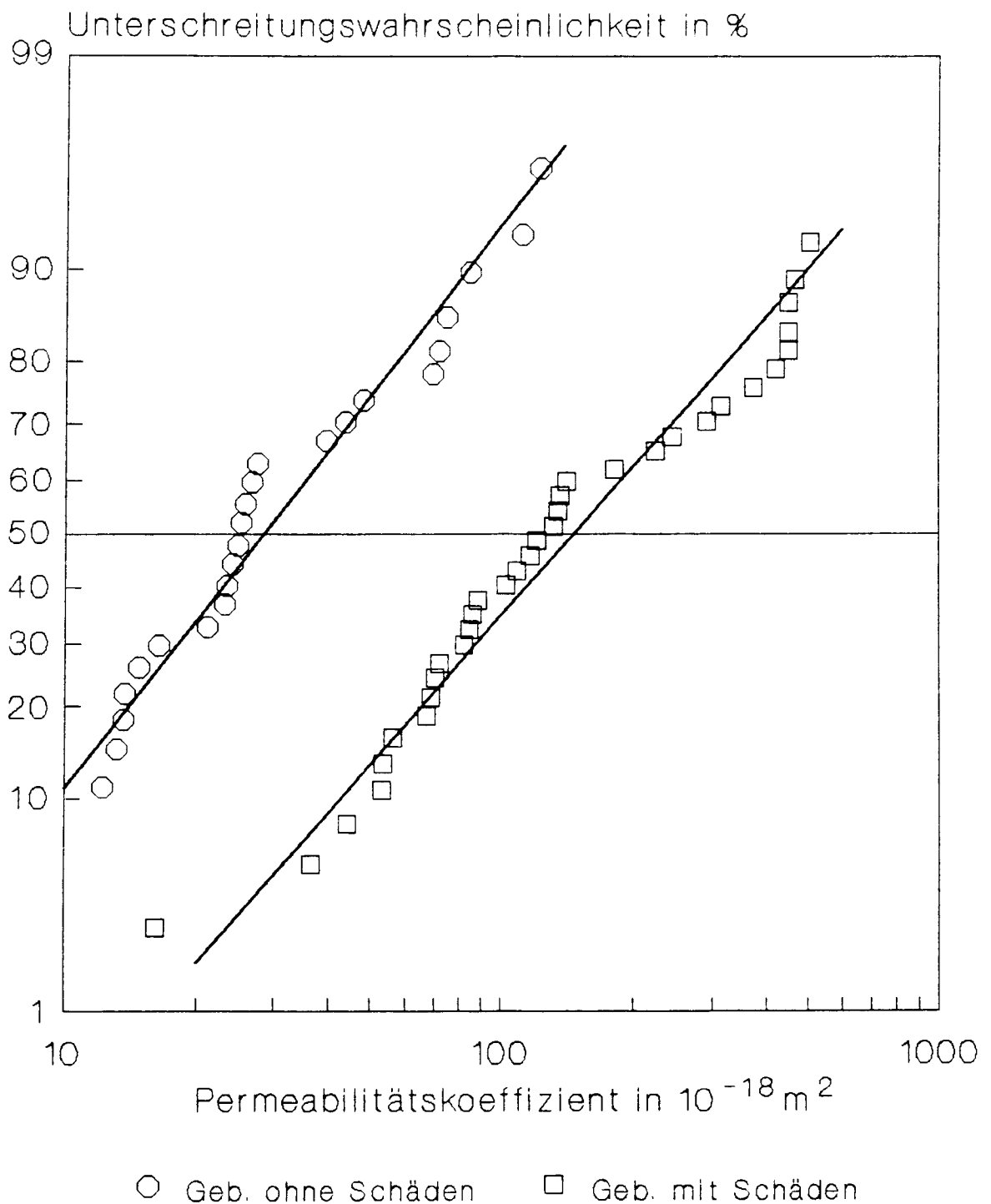
Anlage 9: Abhängigkeit des Permeabilitätskoeffizienten vom massebezogenen Feuchtegehalt, Versuchswürfel nach Anlage 4.
(Die geradlinige Verbindung von Punkten soll nur die Zugehörigkeit zur gleichen Probe kennzeichnen. Zur Bestimmung des funktionalen Zusammenhanges zwischen Feuchtegehalt und Permeabilitätskoeffizient wären Zwischenwerte erforderlich.)



Anlage 10: Permeabilitätsmessungen an frei bewitterten Versuchswänden: Zeitabhängigkeit des Permeabilitätskoeffizienten bei wiederholten Messungen an denselben Meßstellen.



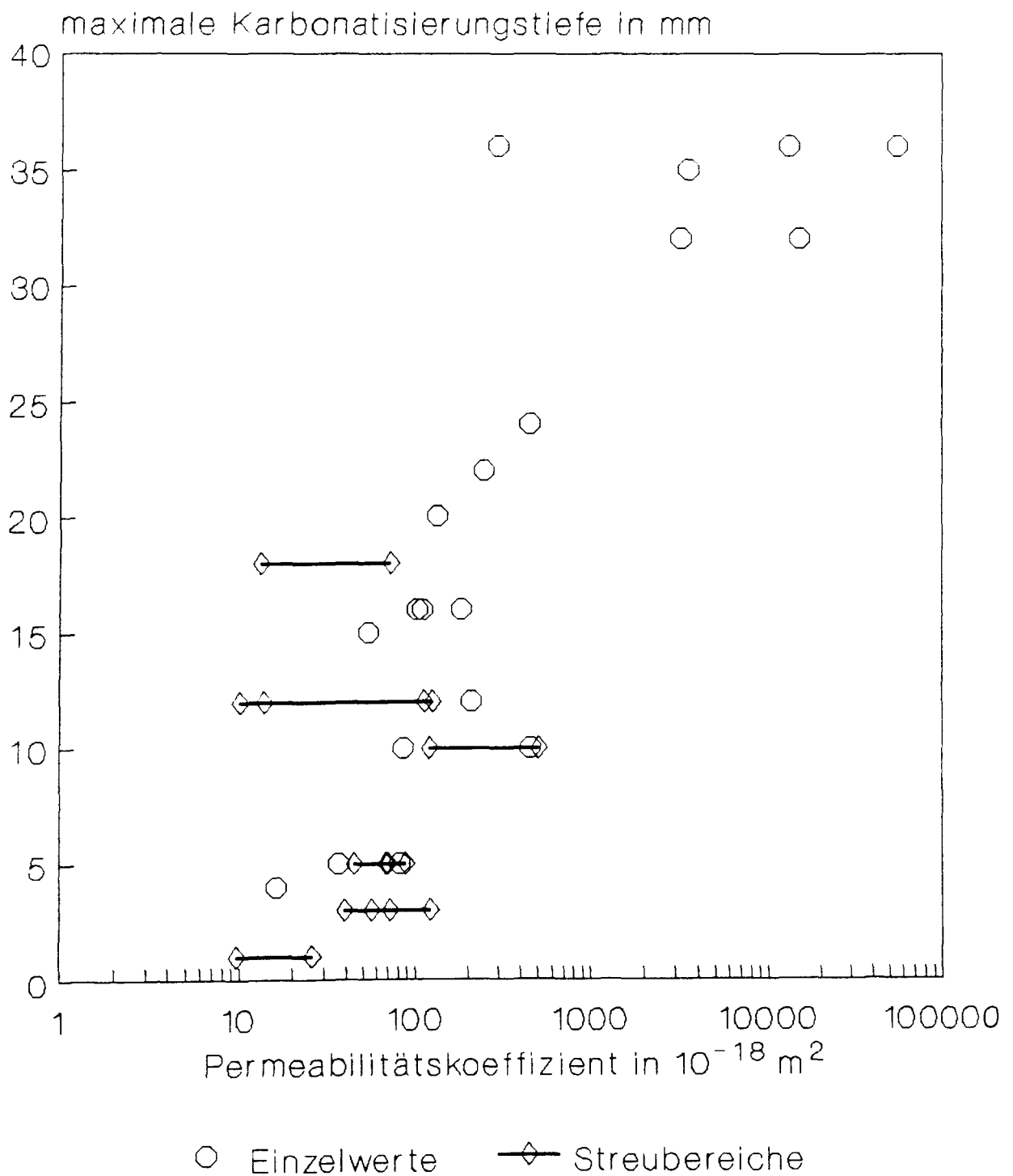
Anlage 11: Permeabilitätsmessungen an älteren Gebäuden mit und ohne Korrosionsschäden, Einzelergebnisse
(Meßergebnisse bewitterter Versuchswände zum Vergleich)



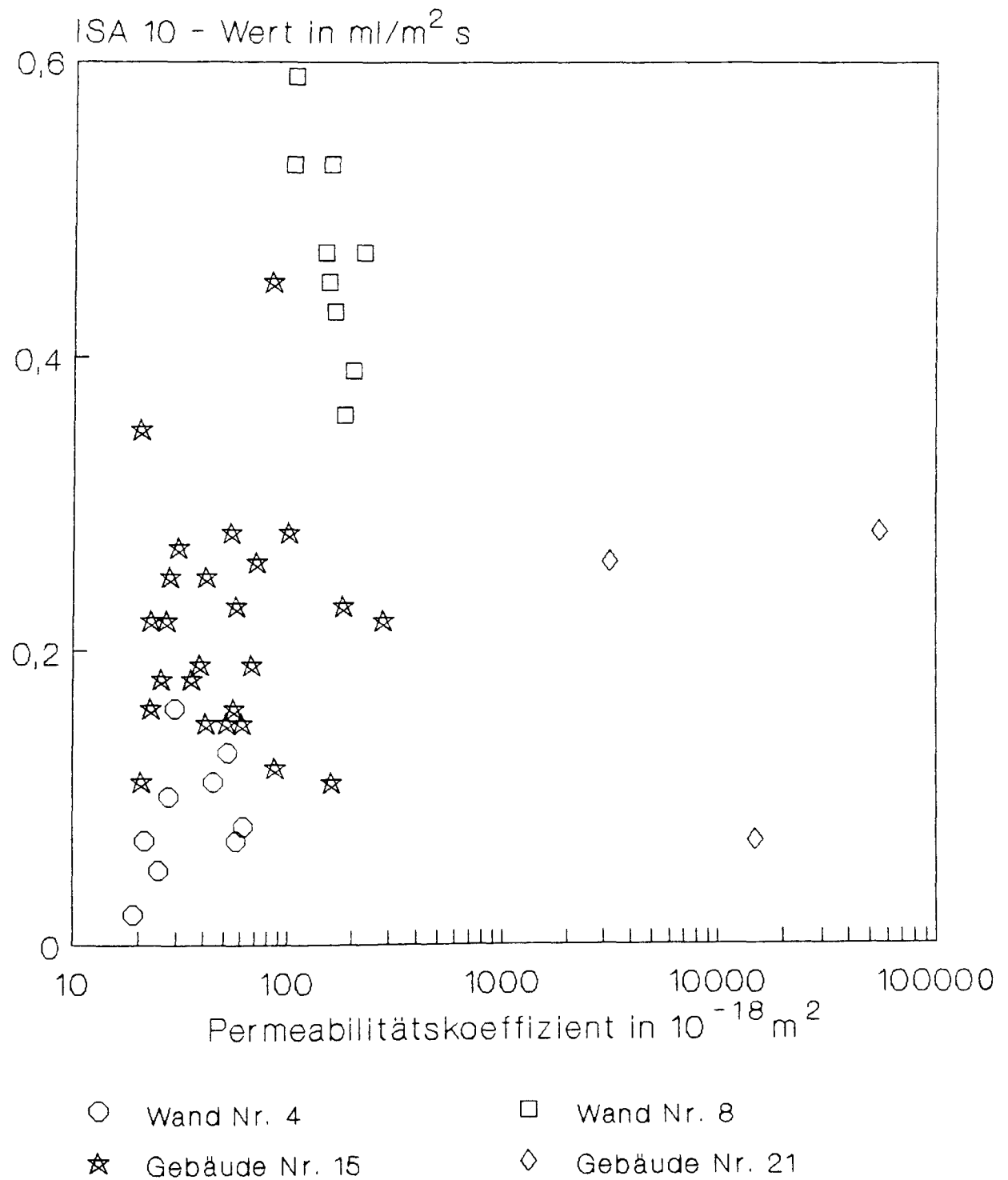
Anlage 12: Permeabilitätsmessungen an älteren Gebäuden:
Wahrscheinlichkeiten für die Unterschreitung eines bestimmten
Permeabilitätskoeffizienten bei Gebäuden ohne bzw. mit Schäden

Gebäude lfd. Nr. nach Anlage 5	Alter bei Messung in Jahren	Meßwerte des Permeabilitäts- koeffizienten in 10^{-18} m^2	Meßwerte der Karbonati- sierungstiefe in mm	Karbonati- sierungstiefe für Alter 25 Jahre in mm
9	38	9,7... 25,7	0... 1	0... 1
10	25	39,2...122	0... 3	0... 3
11	25	13,6...111	2,5...12	2,5...12
12	25	9,9...124	1...12	1...12
13	24	13,1... 71,5	8...18	8...18
14	3	170 460	9...17 15...19	26...49 43...55
17	26	52,8 81,6 102 108 131 450	5...15 1... 5 12...16 11...16 10...20 6...10	5...15 1... 5 12...16 11...16 10...20 6...10
18	25	44,0...70,1 55,8...71,7 68,2...88,2 84,5 120...502	3... 5 2... 3 3... 5 10 5...10	3... 5 2... 3 3... 5 10 5...10
20	17	16,0 36,1 180 242 447	1... 3 1... 4 7...13 13...18 10...20	1... 4 1... 5 8...16 16...22 12...24
21	10	290 3 200 3 500 13 000 15 000 55 000	17...23 10...20 16...22 20...23 13...20 12...23	27...36 16...32 25...35 32...36 21...32 19...36

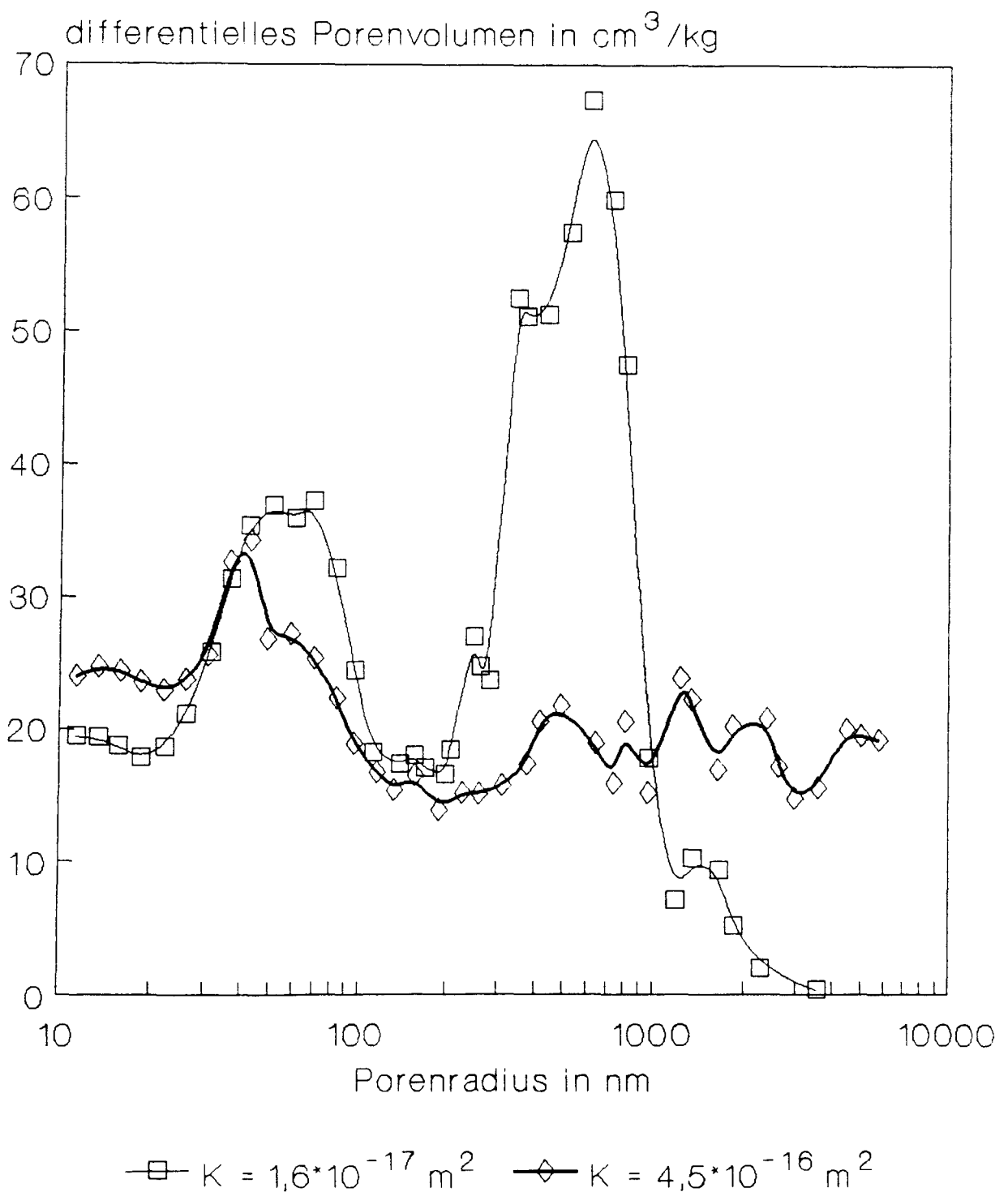
Anlage 13: Meßwerte von Permeabilitätskoeffizient und Karbonatisierungstiefe



Anlage 14: Maximale Karbonatisierungstiefe bei 10 bis 38 Jahre alten Gebäuden, umgerechnet auf ein einheitliches Betonalter von 25 Jahren, in Abhängigkeit vom Permeabilitätskoeffizienten

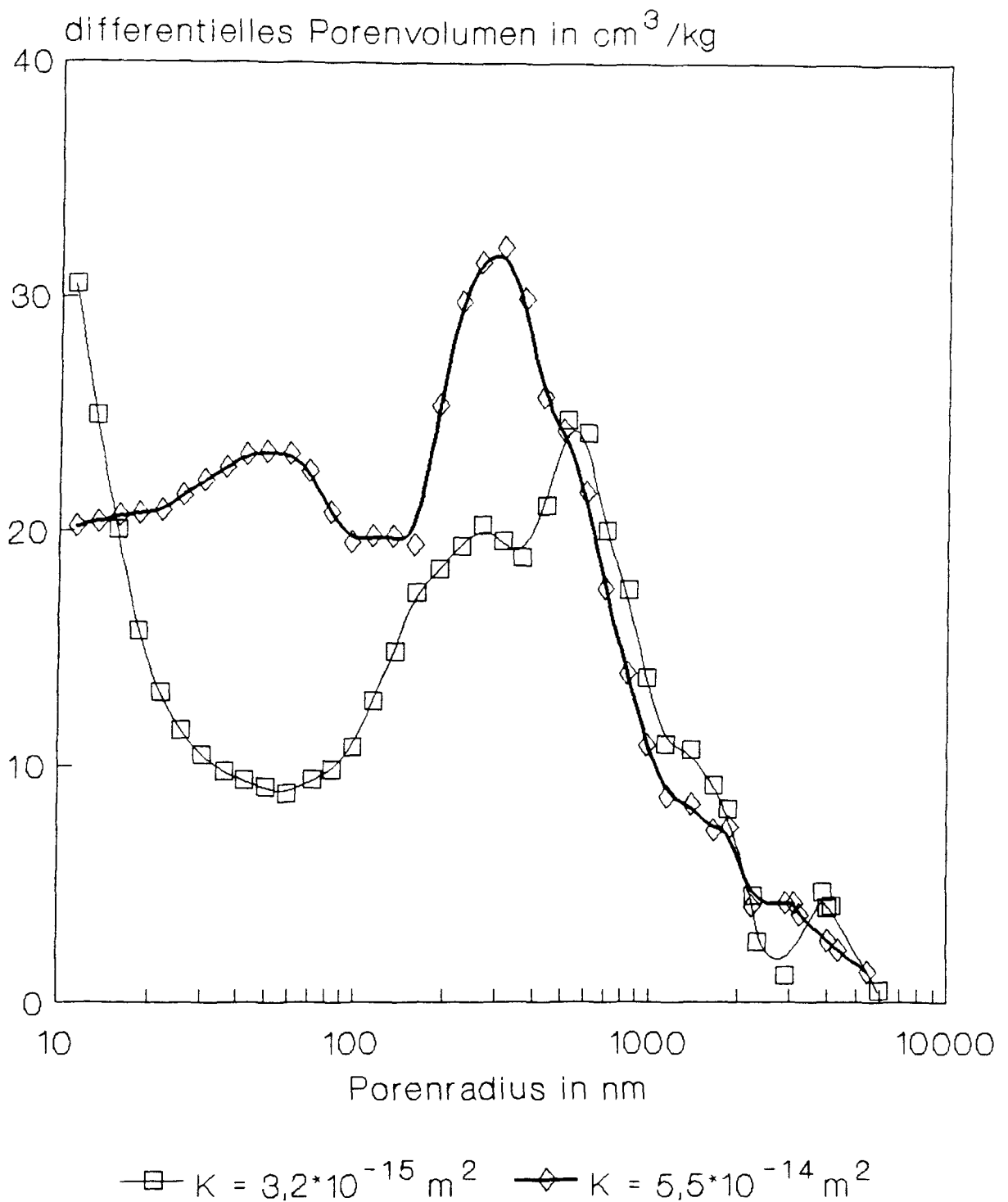


Anlage 15: Vergleichsmessungen des Permeabilitätskoeffizienten für Gas (Bauwerksverfahren) und der Wasseraufnahme (ISAT) an jeweils identischen Meßstellen



Anlage 16: Gebäude Nr. 20

Porenradienverteilung an Meßstellen mit größter und geringster Permeabilität: deutliche Unterschiede, auch bei großen Porenradien



Anlage 17: Gebäude Nr. 21

Porenradienverteilung an Meßstellen mit größter und geringster Permeabilität: kaum Unterschiede bei mittleren und großen Porenradien